

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

Návrh úprav hořáků na koksárenský plyn pro kotel o výkonu  
67 t/h páry v Teplárně Přívoz

Draft Amendments to the Burners for Coke Oven Gas for Boilers  
with 67 t/h of Steam in the Teplárna Přívoz

Student:

Jiří Bernát

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Ostrava 2015

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takové případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jiří Bernát

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Sarajevova 1  
Ostrava – zábřeh  
700 30

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BERNÁT, J. *Návrh úprav hořáků na koksárenský plyn pro kotel o výkonu 67 t/h páry v Teplárně Přívoz.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2015, 56 s. Vedoucí práce: Čech, B.

Diplomová práce je zaměřena na návrh dvou plynových hořáků pro kotel K2 v závodě Teplárna Přívoz. V úvodu jsou srovnány dostupné technologie spojené s problematikou kotlových zařízení a plynových hořáků. V další části je popis současného stavu spalovacího zařízení a postup návrhu plynových hořáků. Dále je popsán návrh umístění hořáků na kotli a popis řešení jednotlivých úprav na kotli. V poslední části je proveden výpočet účinnosti kotle při spalování plynného paliva a veškeré výpočty spojené s návrhem plynových hořáků. Součástí přílohy diplomové práce je výkres plynového hořáku a výkres umístění plynových hořáků na kotli.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

BERNÁT, J. *Draft Amendments to the Burners for Coke Oven Gas for Boilers with 67 t/h of Steam in the Teplárna Přívoz.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetic, 2015, 56 p. Thesis head: Čech, B.

This master thesis is focused on the design of the two gas burners for K2 boiler in the Přívoz heating plant. At the beginning there is a comparison of the available technologies connected with the boiler systems and gas burners issue. The following part is devoted to the description of the current state of the combustion machinery and process of designing of the gas burners. The next section describes the proposed location of the burners on the boiler and solution of the respective boiler modifications. The final part is devoted to the calculation of the boiler efficiency using gas fuel and all the calculations connected with the design of gas burners. Drawing of the gas burners and drawing of placement of the gas burners on the boiler are included in the Annex of the master thesis.

1. Úvod .....	10
2. Odborný úvod .....	10
2.1 Kotle .....	11
2.1.1 Roštové kotle .....	12
2.1.2 Fluidní kotle .....	13
2.1.3 Práškové kotle .....	13
2.2 Paliva .....	16
2.2.1 Pevná paliva .....	16
2.2.2 Kapalná paliva .....	18
2.2.3 Plynná paliva .....	18
2.2.4 Spalování plynných paliv .....	22
2.2.5 Škodlivé složky spalin plynných paliv .....	23
3. Přehled průmyslových plynových hořáků .....	25
3.1 Hořáky podle způsobu přívodu okysličovadla .....	25
3.1.1 Hořáky s přívodem okysličovadla pomocí ejekčního účinku .....	25
3.1.2 Hořáky s nuceným přívodem spalovacího vzduchu .....	27
3.2 Hořáky podle způsobu tvorby spalovací směsi .....	28
3.2.1 Hořáky s předmísenou směsí .....	28
3.2.2 Hořáky bez předmísení (difuzní) .....	28
3.2.3 Hořáky s částečným předmísením .....	29
3.2.4 Hořáky s vícestupňovým přívodem okysličovadla/ paliva .....	29
3.3 Rozdělení hořáků podle typu paliva .....	30
3.3.1 Hořáky na plynná paliva .....	30
3.3.2 Hořáky na kapalná paliva .....	30
3.3.3 Hořáky na tuhá paliva .....	30
3.3.4 Kombinované a více palivové hořáky .....	31
4. současný stav kotle K2 .....	32
4.1 Popis kotle K2 .....	33
4.1.1 Technické parametry kotle .....	33
4.1.2 Technické parametry hořáku .....	33
4.2 Paliva používaná na kotli K2 a jejich parametry .....	34
4.2.1 Černé uhlí a proplástek .....	34
4.2.2 Zemní plyn a Koksárenský plyn .....	35

4.3	Popis plynového hospodářství teplárny .....	36
4.3.1	Přívod koksárenského plynu .....	36
4.3.2	Přívod zemního plynu .....	37
5.	Návrh úprav pro kotel K2 .....	38
5.1	Umístění hořáků na kotli .....	39
6.	Výpočty .....	42
6.1	Výpočet účinnosti kotle pro spalování koksárenského plynu .....	42
6.1.1	Stechiometrie .....	42
6.1.2	Výpočet tepelných ztrát .....	43
6.2	Návrh plynových hořáků .....	45
6.2.1	Výpočet výkonu jednoho hořáku .....	45
6.2.2	Výpočet meze zápalnosti (výbušnosti) koksárenského plynu .....	46
6.2.3	Výpočet spalovací rychlosti KP .....	46
6.2.4	Výpočet spalovacích rychlostí v místě $W_{T1}$ a $W_{T2}$ .....	48
6.2.5	Spalovací poměr .....	50
6.2.6	Výpočet adiabatické spalovací teploty .....	51
6.2.7	Výpočet skutečné teploty plamene .....	51
7.	Předpis pro provoz navržených plynových hořáků .....	52
7.1	Palivo .....	52
7.2	Technické parametry navrženého hořáku .....	53
7.3	Ostatní údaje .....	53
8.	Závěr .....	55
9.	Použitá literatura .....	56
10.	Přílohy .....	56

## Seznam značení

### Použité veličiny

Značka	Jednotka	Veličina
<b>C</b>	[kg.kg <sup>-1</sup> ]	Obsah uhlíku
<b>c, c<sub>s</sub></b>	[J.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Střední měrná tepelná kapacita spalin
<b>M</b>	[kg]	Hmotnost
<b>P</b>	[Pa]	Tlak
<b>P</b>	[W]	Výkon, Příkon
<b>u<sub>n</sub></b>	[m.s <sup>-1</sup> ]	Normálová spalovací rychlost
<b>W<sub>T</sub></b>	[m.s <sup>-1</sup> ]	Spalovací rychlost
<b>S</b>	[m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> ]	Spalovací poměr
<b>Q<sub>n</sub></b>	[J.kg <sup>-1</sup> ]	Spalné teplo
<b>Q<sub>i</sub></b>	[J.kg <sup>-1</sup> ]	Výhřevnost paliva
<b>t</b>	[°C]	Teplota
<b>T<sub>ad</sub></b>	[°C]	Adiabatická spalovací teplota
<b>f<sub>i</sub></b>	[1]	Rychlostní faktor příslušné složky paliva
<b>r<sub>i</sub></b>	[1]	Objemový podíl inertů v palivu
<b>r<sub>O2</sub></b>	[1]	Objemový podíl kyslíku v palivu
<b>V</b>	[m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> ]	Objem vzduchu nebo spalin vztažený na 1kg paliva
<b>W</b>	[kg.kg <sup>-1</sup> ]	Voda obsažená v palivu
<b>n</b>	[1]	Součinitel přebytku vzduchu
<b>α</b>	[1]	Součinitel přebytku vzduchu na výstupu za kotlem
<b>Z</b>	[1]	Relativní tepelná ztráta
<b>η</b>	[1]	Účinnost
<b>Re</b>	[1]	Reynoldsovo číslo
<b>v</b>	[1]	Součinitel vlhkosti
<b>ρ</b>	[kg.m <sup>-3</sup> ]	Měrná hmotnost
<b>ω</b>	[m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> ]	Objemový podíl složky ve směsi plynů
<b>L<sub>d</sub></b>	[%]	Dolní mez zápalnosti
<b>L<sub>h</sub></b>	[%]	Horní mez zápalnosti

## Použité indexy

Index	Význam
<b>0</b>	Počáteční; základní, vstupní
<b>A</b>	Analytický
<b>ad</b>	adiabatický
<b>C</b>	Uhlík; hořlavina v tuhých zbytcích
<b>Skut</b>	Skutečný
<b>CO</b>	Oxid uhelnatý; hořlavina ve spalínách
<b>CO<sub>2</sub></b>	Oxid uhličitý
<b>H<sub>2</sub></b>	Vodík
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Voda; vodní pára
<b>I</b>	Složka směsi
<b>In</b>	Vstupní; vnitřní
<b>N<sub>2</sub></b>	Dusík
<b>O<sub>2</sub></b>	Kyslík
<b>Pal</b>	Palivo; přivedeno palivem
<b>SK</b>	Skutečný
<b>Sk</b>	Škvára; struska
<b>SO<sub>2</sub></b>	Oxid siřičitý
<b>Spal</b>	Spalitelný
<b>Sp</b>	Spaliny
<b>Sv</b>	Sdílení tepla do okolí
<b>T</b>	Teoretický (minimální)
<b>Vyr</b>	Vyrobený (výkon)
<b>Vz</b>	Vzduch
<b>W</b>	Voda, vodní pára
<b>Z</b>	Ztráty



## Použité exponenty

Exponent	Význam
<b>D</b>	Sušina, suchý stav
<b>H</b>	Hořlavina (palivo bez vody a popela)
<b>R</b>	Surový stav
<b>S</b>	Suchý
<b>V</b>	Vlhký
<b>μ</b>	Poissonova konstanta

## Použité zkratky

Zkratka	Význam
<b>KP</b>	Koksárenský plyn
<b>SK</b>	Spalovací komora
<b>TG</b>	Turbogenerátor
<b>TPV</b>	Závod Teplárna Přívoz
<b>VEČR</b>	Veolia Energie Česká republika, a.s.
<b>ZP</b>	Zemní plyn

## 1. Úvod

Diplomová práce se zabývá problematikou spalování přebytků koksárenského plynu ve společnosti Veolia Energie ČR, a.s. (dále jen VEČR). Společnost je významným výrobcem a dodavatelem tepelné a elektrické energie v České republice. V Ostravě provozuje mimo jiné dva základní teplárenské zdroje, Závod Teplárna Přívoz (dále jen TPV) a Závod Elektrárna Třebovice. Koksárenský plyn se spaluje však jen v Teplárně Přívoz, proto je práce zaměřena právě na TPV. Oba zdroje jsou organizačně začleněny jako závody pod Region Severní Morava. Mimo tyto dva závody spadá do Regionu Severní Morava ještě Závod Distribuce a služby, Závod Krnov a správní útvary regionu, které zajišťují ekonomické, správní, personální, obchodní a některé technické činnosti společně pro všechny závody.

TPV disponuje čtyřmi kotli K1 až K4 o celkovém jmenovitém tepelném výkonu 198,8 MW<sub>t</sub> a elektrickém výkonu 13,51 MW. TPV je situována hned vedle OKK, Koksovny, a.s. (Koksovny Svoboda), takže odebírá z koksovny veškeré přebytky koksárenského plynu. Množství odebíraného plynu odpovídá 15 000 m<sup>3</sup>/h. Toto množství plynu dokáže TPV spálit pouze při provozu dvou kotlů současně. Pouze kotle K1 a K4 jsou upraveny tak, aby byly schopny spalovat koksárenský plyn. Z tohoto důvodu chce VEČR provést úpravy na kotli K2 tak, aby byl tento kotel schopen zajistit 100% zálohu za jeden z kotlů K1 nebo K4 při nahodilých či plánovaných odstávkách. Oba kotle K1 a K4 společně dosahují při spalování KP ve výši 15 000 m<sup>3</sup>/h v letním období tepelný výkon cca 60 MW<sub>t</sub>. Každý z kotlů K1 a K4 dosahuje při spalování KP maximálního výkonu 40 MW<sub>t</sub>, který zajišťují čtyři plynové hořáky po 10 MW<sub>t</sub> na kotel.

Hlavním cílem diplomové práce je navrhnout vhodné úpravy pro kotel K2 tak, aby mohl být provozován pouze na koksárenský plyn do maximálního výkonu 40 MW<sub>t</sub> a zároveň, aby mohl být tento kotel provozován v režimu spoluspalování koksárenského plynu a uhlí jak je tomu u kotlů K1 a K4. Řešení spočívá v návrhu dvou plynových hořáků na koksárenský plyn, které budou instalovány na kotel K2. Dále bylo třeba vyřešit umístění hořáků (kde a jak budou instalovány na kotli), vyosení obou hořáků, aby nedocházelo k ovlivňování jednoho plamene druhým, a tím pádem k narušení teplotního pole uvnitř spalovací komory. Výkresová dokumentace obsahuje samostatný výkres sestavy hořáku a druhý výkres obsahuje umístění těchto dvou plynových hořáku na kotli K2.

## 2. Odborný úvod

Parní kotel lze definovat jako zařízení, které slouží k ohřevu jiného média. Nejčastějším médiem je voda, která se po ohřevu stává tlakovou parou pro energetické účely. K ohřevu vody dochází spalováním paliva ve spalovací komoře. Spalování je proces, kdy dochází k přeměně chemické energie v palivu na energii tepelnou. Kotle dělíme podle různých kritérií. Nejčastěji se kotle rozdělují podle použitého paliva, podle způsobu spalování a podle přetlaku vyrobené páry.

### Dělení podle použitého paliva:

- Kotle na tuhá paliva
- Kotle na kapalná paliva
- Kotle na plynná paliva
- Kotle na směsi paliv

### Dělení podle způsobu spalování:

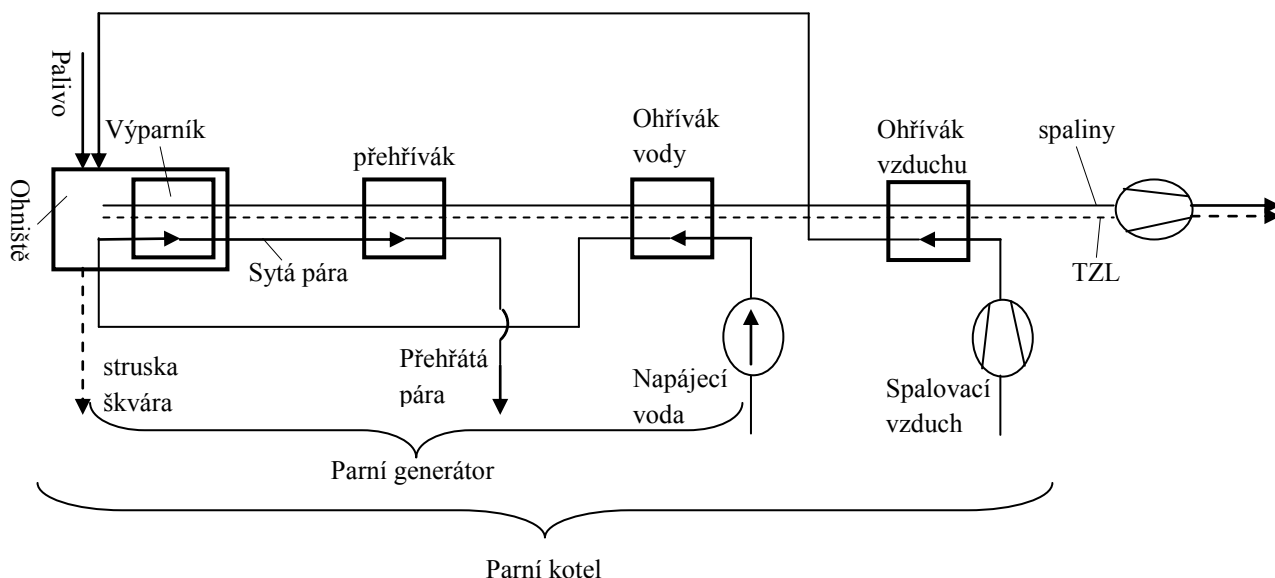
- Kotle roštové
- Kotle fluidní
- Kotle práškové (s výtavným nebo granulačním ohništěm)

### Dělení podle přetlaku vyrobené páry:

- |                     |                |     |
|---------------------|----------------|-----|
| • Nízkotlaké kotle  | od 0 do 0,07   | MPa |
| • Středotlaké kotle | od 0,07 do 6,4 | MPa |
| • Vysokotlaké kotle | 6,4 a výše     | MPa |
| • Nadkritické kotle | nad 22,5       | MPa |

## 2.1 Kotle

Parní kotel je systém mnoha zařízení, které jsou uspořádány postupně v proudu spalin. Mezi tato zařízení patří ohniště, výparník, rozvody spalovacího vzduchu (primární, sekundární a terciální vzduch), přehřívák, ohřívák vody, ohřívák vzduchu atd. Grafické znázornění jednotlivých částí kotle je na obr. č. 2.1. Kotle pro průmyslové závody mají výkon v rozsahu od několika tun až do několika tisíc tun páry za hodinu.



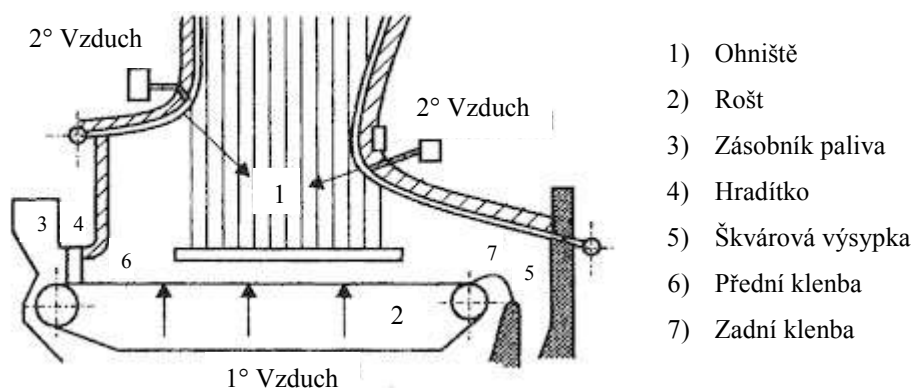
Obr. č. 2.1. Uspořádání hlavních částí kotle podle umístění proudu spalin

### Dělení kotlů podle pracovního média:

- Parní kotle – Přehřátá pára s parametry 10-14 MPa a 450 – 550 °C
- Horkovodní kotle – Horká voda o tlaku nad 0,2 MPa a teplotě nad 115°C

#### 2.1.1 Roštové kotle

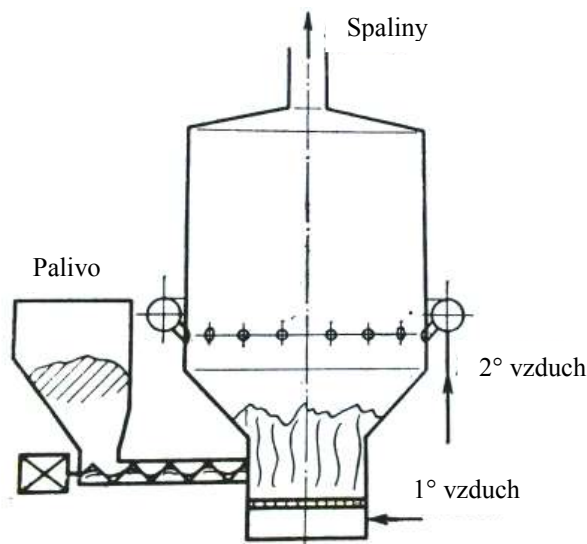
Jde o nejstarší typy kotlů. Jsou určeny převážně ke spalování kusových paliv, které jsou na roštu uloženy ve vrstvě. Tloušťku vstvy určuje tepelný výkon ohniště a prodyšnost vrstvy spalovacím vzduchem. Roštová ohniště mají granulometrii větší než 10 mm. Využití tohoto typu kotlů najdeme jak v průmyslu, tak i v domácnostech. V současnosti je velké množství roštových kotlů v provozu, ale nové už se moc nestaví. Výstavba nových roštových kotlů je typická hlavně pro spalování biomasy (dřevní štěpka, piliny, sláma a pro spalování průmyslových a komunálních odpadů. Hlavní části roštového ohniště jsou vyobrazeny na obr.č. 2.2



Obr.č.2.2 Základní části roštového ohniště [1]

### 2.1.2 Fluidní kotle

Ve fluidním kotli se palivo spaluje ve vznosu díky nadnášení proudy vzduchu a spalin. Dochází zde k rovnováze mezi tíhou a aerodynamickým odporem částic. Palivo je přiváděno do spodní části kotle pneumaticky nebo šnekovitým podavačem. Palivo o větší granulometrii se spaluje ve spodní části spalovacího prostoru, ten je zúžený a rychlost vzduchu v tomto místě je vyšší (viz. Obr.č.2.3). Tuhé znečišťující látky a popílek jsou unášeny spalinami pryč z ohniště. Spalovací teplota je u fluidních kotlů od 700 °C do 900 °C, aby nedocházelo ke spékání popela. Granulometrie u fluidních kotlů se pohybuje v rozsahu 0 až 6 mm.



Obr.č.2.3 Fluidní kotel [1]

### 2.1.3 Práškové kotle

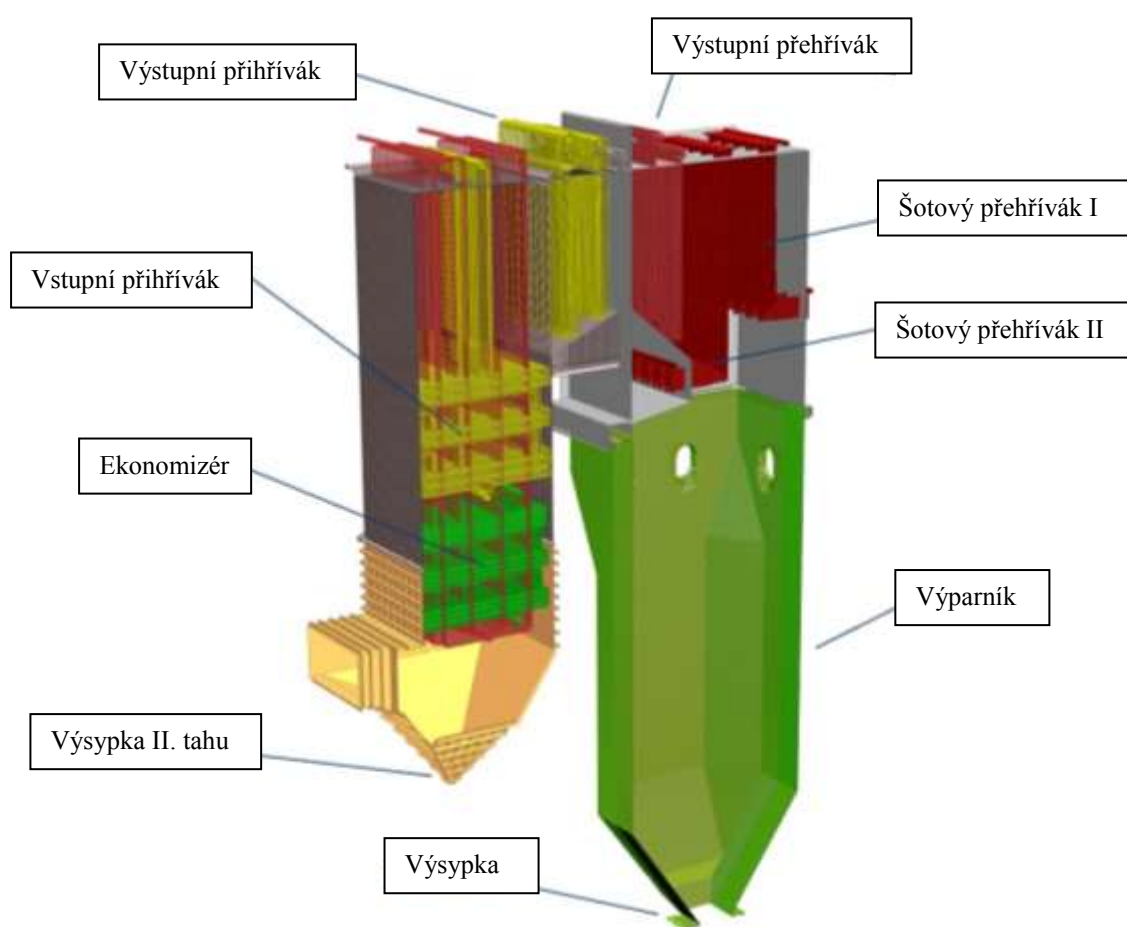
U práškových kotlů se spaluje jemně umletý uhelný prášek, který se přivádí tryskami hořáků spolu se spalovacím vzduchem do prostoru ohniště. Uhlenný prášek se dopravuje ze mlýnů do spalovacího prostoru pneumaticky. Jako nosného média se používá část spalovacího vzduchu (primárního vzduchu) nebo spalin popř. směsi spalin a vzduchu. Granulometrie u práškových kotlů se pohybuje pod 1 mm, tím se zvětší povrch paliva až 200 krát. Doba, kterou setrvá palivo v ohništi je cca 1 až 3 vteřiny.

Mezi nevýhody práškových kotlů patří vyšší investiční náklady, vysoká vlastní spotřeba energie díky výstavbě mlecího okruhu a dochází k zanášení výhřevných ploch popílkem. Spalovací vzduch je předehříván na 300 až 450 °C.

Konstrukce práškových kotlů se vyskytuje ve dvou variantách. První varianta spočívá v tom, že uhelný prášek se spaluje za takové teploty, kdy ještě odchází struska z ohniště v tuhém stavu. Tento typ práškového ohniště se nazývá granulačním. U druhé varianty se uhelný prášek spaluje při vyšších teplotách, takže popel, který se zachytí v ohništi, odchází ze spalovacího prostoru ve formě tekuté strusky. Tento typ ohniště se nazývá výtavné.

### 2.1.3.1 Granulační ohniště

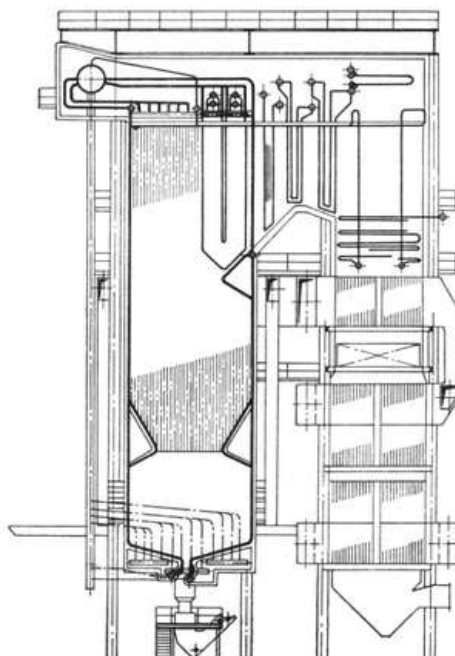
Granulační ohniště má tvar svislého hranolu s charakteristickým zúžením spodní části (viz.obr.2.4). Tomuto zúžení se říká výsypka, kde dochází k odvodu části tuhých zbytků po spálení. Kdybychom provedli příčný řez ohništěm, zjistili bychom, že ohniště má tvar čtvercový, obdélníkový a někdy i mnohoúhelníkový. Podle tvaru ohniště volíme umístění hořáků na kotli. U granulačních ohnišť mohou být hořáky umístěny kdekoli, kromě dna ohniště. Spalovací teplota se pohybuje mezi 1 100 až 1 500 °C. Spalovací komora se musí dostatečně chladit, jinak by došlo k překročení teploty tečení popele, a mohlo by dojít k nalepení změkklé strusky na stěny ohniště. Díky relativně nízké spalovací teplotě se nejčastěji používají ke spalování méněhodnotná paliva (hnědé uhlí a lignit) a paliva s vysokým obsahem prchavé hořlaviny. Velikou předností granulačních ohnišť je, že snadno udržují malé výkony (bez použití jakýchkoli stabilizačních hořáků). Další výhodou je hrubší mletí paliva, takže se většinou používá jednoduchých mlecích okruhů. Nevýhodou granulačních ohnišť jsou potíže s uskladněním popílku. Granulační ohniště je schopno zachytit pouze malý podíl popela ve formě strusky (cca 20 %).



Obr.č.2.4 Kotel s granulačním ohništěm [4] 14

### 2.1.3.2 Výtavné ohniště

U výtavných ohnišť se palivo spaluje při vyšších teplotách, než je tomu u granulačních ohnišť. Díky této vysoké teplotě se popeloviny roztaví a odstraňují se z ohniště v tekutém stavu. Vyšších spalovacích teplot dosáhneme snížením chlazení plamene stěnami ohniště, zvýšením teploty spalovacího vzduchu, zvětšením jemnosti mletí paliva a zvýšením intenzity směšování paliva se vzduchem. Dno výtavného prostoru je na rozdíl od granulačního ohniště vodorovné nebo má mírný sklon (viz.Obr.č.2.5). Tekutá struska odtéká z výtavného prostoru výtokovým otvorem do granulační nádrže naplněné vodou, zde dochází k prudkému ochlazení a tím se struska rozpadne na struskový písek. Další důležitou částí výtavných ohnišť je vychlazovací prostor. Zde dochází k ochlazení spalin, a proto částičky strusky unášené spalinami ztuhnou a nenalepí se na výhřevné plochy.



Obr.č.2.5 Kotel s výtavným ohništěm [1]

#### Srovnání výtavných a granulačních ohnišť:

- Výhoda výtavného ohniště spočívá ve vyšším stupni zachycení popele přímo v ohništi asi 40 - 70 %.
- Výhoda granulačního ohniště je jeho regulační rozsah, který je ve srovnání s výtavným ohništěm vyšší a nebezpečí tuhnutí strusky v okolí výtokového otvoru je nižší. Možnost regulace je u výtavných ohnišť asi 60 -100% a u granulačních ohnišť 30 -100 %.
- Naopak nevýhoda výtavných ohnišť spočívá ve vysoké teplotě spalování, při které dochází k odpařování části popelovin, které pak kondenzují na plochách kotle, kde tvoří jen těžko odstranitelné nánosy.
- Veliká nevýhoda výtavných ohnišť je vysoká tvorba emisí NOx. Jde hlavně o termické NOx vznikající za vysokých teplot. Tato vysoká tvorba NOx způsobila zánik kotlů s výtavným ohništěm, protože limity tvorby emisí NOx jsou čím dál přísnější.

## 2.2 Paliva

Z obecného hlediska se jedná o látku popřípadě směs látek, které jsou za určitých podmínek schopny hořet. Hoření je možné díky chemicky vázané energii, která se při hoření mění na energii tepelnou.

Požadovanou vlastností paliva je co nejvyšší výhřevnost. Výhřevnost je ovlivněna vlastnostmi látek, ze kterých je složena a zároveň jejich množstvím v daném palivu. Hlavní je pro nás obsah hořlaviny v palivu. Kromě hořlaviny obsahují paliva i balast (nehořlavé součásti: voda, popelovina a inertní plyny), které výhřevnost naopak snižují.

### 2.2.1 Pevná paliva

Nejrozšířenějším a nejvíce využívaným pevným palivem je uhlí (černé, hnědé, proplástek). Dalšími velmi často využívanými pevnými palivy jsou biomasa, rašelina, zemědělské, průmyslové a komunální odpady, koks a další.

Každé tuhé palivo má tři základní složky: vodu ( $W = \text{water}$ ), popelovinu ( $A = \text{ash}$ ) a hořlavinu ( $h$ ). Součet  $W+A+h$  musí být roven 100% jak naznačuje tabulka č.2.1

Přimísená voda	← Surové uhlí →		
	Voda ( $W^r$ )	Popelovina ( $A^r$ )	Hořlavina ( $h$ )
balast		Prchavý podíl	Tuhý podíl
		Bezvodé uhlí (sušina)	
← Spálením vznikne →			
Vodní pára		Tuhé zbytky (struska, popílek)	Spaliny

Tabulka č.2.1 Hrubý rozbor tuhé paliva [10]

#### Voda obsažená v palivu:

Čím vyšší podíl vody je v palivu, tím je nižší výhřevnost tohoto paliva. Procentuální zastoupení vody v palivu závisí na druhu paliva, lokalitě jejího těžiště a na úpravě paliva. Při spalování se voda mění na páru a odchází spolu se spaliny.

#### Popelovina obsažená v palivu:

Popelovinu tvoří minerální látky jako například křemičitany, sírany, uhličitany a další. Spálením vzniká popel. Popel je tuhý, netěkavý zbytek popeloviny a má stejně negativní vliv na výhřevnost paliva jako voda v palivu



### Hořlavina obsažená v palivu:

Hořlavina je pro nás tou nejpodstatnější součástí paliva. Je to aktivní součást paliva a při hoření uvolňuje tepelnou energii. Skládá se ze dvou druhů prvků - aktivních a pasivních. Mezi aktivní prvky patří uhlík, vodík a síra a mezi pasivní patří dusík a kyslík, zároveň musí platit, že  $C+H+S+N+O=1$ .

Součástí hořlaviny je prchavá hořlavina, její podíl v palivu se určí koksovací zkouškou. Prchavá hořlavina se uvolňuje na začátku spalování a napomáhá při vzněcování paliva v ohništi.

### Výhřevnost a spalné teplo:

- Výhřevnost ( $Q_i$ ) je množství tepla uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na teplotu okolí za vzniku vody ve formě páry. Pro určitý druh paliva a lokalitu je výhřevnost víceméně konstantní viz. tabulka č.2.2
- Spalné teplo ( $Q_n$ ) je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na teplotu okolí za vzniku vodní páry kondenzací.

Palivo	Výhřevnost $Q_i^h$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ]
Dřevo	17 500
Lignit	26 100
Rašelina	24 700
Vysokopecní koks	33 200
Kladenské uhlí	31 100
Svatoňovické uhlí	33 400
Ostravské uhlí	34 500

Tabulka č.2.2 Příklady výhřevností hořlaviny pevných paliv [11]

### U pevných paliv určujeme tyto základní vlastnosti:

- spalné teplo, výhřevnost
- hrubý rozbor - slouží k určování poměru mezi hořlavinou, popelovinou a vodou obsaženou v daném palivu viz tabulka č.2.1
- elementární (prvkový) rozbor - stanoví poměrné obsahy prvků a hořlaviny
- podíl prchavé hořlaviny
- melitelnost
- měrná hmotnost
- sypná hmotnost
- bod vzplanutí
- zápalná teplota a další

### 2.2.2 Kapalná paliva

Nejčastěji jsou kapalnými palivy frakce vzniklé destilací ropy s bodem varu 60-350°C. Neupravená ropa se využívá spíše výjimečně. Tyto frakce ropy (viz tabulka č.2.3) dělíme na:

- extralehké topné oleje
- lehké topné oleje
- střední topné oleje
- těžké topné oleje
- dehet

#### Výhody topných olejů:

- snadno se vznítí
- doprava a skladování jsou snadné a nízkonákladové.
- lze dosáhnout vyšší účinnosti kotle, díky nízkému přebytku vzduchu při spalování (přbytek vzduchu se pohybuje kolem 1,06 až 1,1).

Druh oleje	Hustota	Složení					Výhřevnost
		[%]					
	[kg·m <sup>3</sup> ]	C	H	O	N	S	[MJ·kg <sup>-1</sup> ]
Extra lehký	0,85	86	12,9	0,5	-	0,6	42,8
Lehký	0,89	85,6	12,6	0,7	-	1,1	42,2
Střední	0,91	85,1	11,5	0,7	-	2,7	40,5
Těžký	0,99	83,9	11,2	1,2	0,5	3,4	39,9
Dehet	1,06	88,9	6,6	1,8	1,1	0,9	37,5

Tabulka č.2.3 Příklady topných olejů [11]

### 2.2.3 Plynná paliva

Do této skupiny řadíme všechny plyny, které obsahují hořlavé složky (CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>) a používají se na spalování. Plynným palivem je většinou směs hořlavých plynů, někdy s příměsí plynů inertních. Jejich fyzikální vlastnosti jsou závislé na teplotě a tlaku a nelze je tedy považovat za konstantní. Pokud tedy mluvíme o hodnotách fyzikálních vlastností (výhřevnost, viskozita a další), jsou to hodnoty platné pouze pro daný stav (teplota, tlak). Pokud není uvedeno jinak, používáme normálních podmínek (101,325 kPa a 0°C).

### **Rozdělení plynných paliv:**

- Plynná paliva se spalným teplem  $Q_n$  nižším než  $16,8 \text{ MJ.m}^{-3}$ 
  - málo výhřevné nebo též "chudé" plyny a patří zde například vysokopecní plyn a generátorové plyny
- Plynná paliva se spalným teplem  $Q_n$  od  $16,8 \text{ MJ.m}^{-3}$  do  $20 \text{ MJ.m}^{-3}$ 
  - středně výhřevné plyny a patří zde například svítiplyn, směsné plyny (např. směs generátorových plynů se svítiplynem) a zemní plyn se vzduchem
- Plynná paliva se spalným teplem  $Q_n$  od  $20 \text{ MJ.m}^{-3}$  do  $50 \text{ MJ.m}^{-3}$ 
  - velmi výhřevné nebo též "bohaté" plyny a patří zde například koksárenský plyn, zemní plyn karbonský, zemní plyn naftový a bioplyny (kalové plyny, plyny ze skládek odpadů) a směsi propanbutanu se vzduchem
- Plynná paliva se spalným teplem  $Q_n$  vyšším než  $80 \text{ MJ.m}^{-3}$ 
  - vysoce výhřevné plyny a patří zde například zkapalněné uhlovodíkové plyny (propan, butan a jejich směsi)

### **Základní vlastnosti plynných paliv:**

- spalné teplo, výhřevnost
- měrná hmotnost
- měrná tepelná kapacita
- meze výbušnosti plynu
- obsah nečistot v plynu
- vlhkost plynu
- hutnota plynu
- tlak plynu
- bod vzplanutí
- zápalná teplota
- teplota hoření

### **Spalné teplo**

Je teplo uvolněné při dokonalém spalování 1kg paliva s kyslíkem, jestliže spaliny jsou ochlazený na původní teplotu paliva a voda ve spalínách je v kapalném stavu. Jelikož je kondenzace vody spíše nežádoucí jev (může působit korozi zařízení), používá se spíše výhřevnost.

## Výhřevnost

Udává hodnotu tepla uvolněného při dokonalém spalování 1kg paliva s kyslíkem, jestliže spaliny jsou ochlazený na původní teplotu paliva a voda ve spalínách je v plynném skupenství. Výhřevnosti pro plynná paliva jsou uvedeny níže v tabulce č.2.4.

Plyn	Výhřevnost	Složení						
	$Q_i^r$	[%]						
	[MJ·m <sup>-3</sup> ]	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>
Metan	35,6	-	-	-	-	-	100	-
Zemní plyn	35,3	0,2	-	0,6	-	-	98	1,3
Vodní plyn	10,4	6,2	0,3	-	3,7	52	0,6	3
Koksárenský plyn	16,2	2,4	0,7	2,4	6,7	58	21,5	8,3
Vysokopecní plyn	3,8	11	-	-	27	3,2	0,4	58,2
Generátorový plyn	5,3	5,4	0,2	-	27	13,4	0,5	53,3

Tabulka č.2.4 Příklady plynných paliv + výhřevnost a složení [11]

## Hutnota

Je určena složením plynu a je důležitým kritériem pro určení spalovacích vlastností a dopravě plynu.

## Tlak

Tato vlastnost je podstatná hlavně při rozvodu plynných paliv potrubím.

Rozeznáváme čtyři druhy tlaků:

- nízký tlak - do 5 kPa
- střední tlak - od 5 kPa do 0,4 MPa
- vysoký tlak - od 0,4 MPa do 4 MPa
- velmi vysoký tlak - od 4 MPa

## Zápalná teplota

Jedná se o nejnižší teplotu, při které se plyn samovolně zapálí a hoří. Tato teplota se pohybuje okolo 500 - 700°C. Oxidace probíhá i za normálních podmínek, ale velmi pomalu, proto zvyšujeme teplotu, aby pomalá oxidace přešla v řetězovou reakci.

## Teplota hoření

Je nevyšší dosažitelná teplota plamene při spalování daného plynu. Důležitá vlastnost pro navrhování spalovací komory.

## Meze zápalnosti

Téměř všechny hořlavé plyny mohou se vzduchem nebo kyslíkem vytvořit nebezpečnou směs, která je schopna při styku se zdrojem zapálení reagovat. Tato reakce je možná pouze v určitém rozmezí koncentrace, které je experimentálně určeno. Mezní hodnoty koncentrace jsou dvě a to dolní a horní meze zápalnosti a obvykle se udávají v procentech.

- **Dolní mez** - minimální podíl plynného paliva ve směsi s kyslíkem nebo vzduchem, který už umožňuje samovolné šíření plamene. Pod touto hranicí směs nelze zapálit.
- **Horní mez** - maximální podíl plynného paliva ve směsi s kyslíkem nebo vzduchem, který ještě umožňuje samovolné šíření plamene.

## Charakteristika vybraných druhů plynů

- **Zemní plyn**

Nejrozšířenější a nejpoužívanější zástupce plynných paliv v energetice. Hlavní složkou je vždy metan (obvykle 88-99,8%), jinak je jeho složení proměnlivé - liší se i podle ložisek. Ložiska zemního plynu většinou doprovází ložiska ropy, může být také s ložisky uhlí anebo samostatně. Těží se pod zemským povrchem v hloubce od 0 do 8000 metrů. Je to nejedovatý plyn a bez zápachu. Z bezpečnostních důvodů (identifikace úniku) se obohacuje o páchnoucí složku.

Předností zemního plynu je, že při spalování nevzniká popílek a vzniká jen minimální množství emisí SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> a CO<sub>x</sub>.

Použití zemního plynu v domácnosti: - Polovina domácností jej používá na vaření.

- Cca 20% domácností zemní plyn využívá také na topení a ohřev vody.

- **Koksárenský plyn**

Koksárenský plyn vzniká jako vedlejší produkt při výrobě koksu karbonizací (koksováním) černého uhlí. Tento proces probíhá při teplotách 1050 - 1100°C. Aby byl plyn použitelný, musí se ještě zbavit nežádoucích složek (dehet, benzol, naftalen, amoniak a sulfan), zabránuje se tak korozi trubek a vzniku emisí SO<sub>2</sub>. Koksárenský plyn má charakteristický zápach, je hořlavý, jedovatý (díky obsahu většího množství oxidu uhelnatého) a jeho výhřevnost je od 15 do 18 MJ.m<sup>-3</sup>. Další vlastnosti závisí na druhu použitého černého uhlí. Jeho podrobnější složení viz tabulka č.2.5.

Složka	Podíl [%]
$H_2$	46 – 61
$CH_4$	21 – 30
$N_2$	3 – 13
$CO$	5 – 8,5
$CO_2$	1 – 4
$C_nH_m$	3 – 7
$O_2$	0,4 – 1,7

Tabulka č.2.5 Složení koksárenského plynu [11]

#### 2.2.4 Spalování plynných paliv

- **Dokonalé spalování plynných paliv**

Jedná se o proces, při kterém se spalují všechny hořlavé složky beze zbytku na  $CO_2$  a  $H_2O$ . Podmínkou pro dokonalé spalování je hodnota násobku stechiometrického objemu vzduchu  $n > 1$ .

Po dokonalém spálení plynného paliva najdeme ve spalínách  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$  a  $O_2$  (z nadbytečného objemu vzduchu). Při dokonalém spalování by měl být obsah oxidu uhelnatého roven nule, ale v reálných podmínkách považujeme za dokonalé spalování i spalování, při kterém vznikne podlimitní množství oxidu uhelnatého (limit najdeme v normě ČSN 075801 - Hořáky na plynná paliva)

- **Nedokonalé spalování plynných paliv**

Při nedokonalém spalování se  $m^3$  paliva dodá menší než stechiometrický objem kyslíku. Hodnota násobku stechiometrického objemu je  $n < 1$ .

Po nedokonalém spálení plynného paliva najdeme ve spalínách kromě  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$  a  $O_2$  také nespálené složky plynného paliva.

##### **Příčiny nedokonalého spalování**

- Nesprávné řízení spalovacího procesu.
- Záměrné řízení spalovacího procesu s  $n < 1$ .
- Nesprávné konstrukční řešení spalovacího řízení.

## **2.2.5 Škodlivé složky spalin plyných paliv**

### **Vznik škodlivých látek**

Velká část světové produkce energie je závislá na fosilních palivech (palivech organického původu) nebo palivech získávaných jejich úpravou vzniklých jako hlavní nebo vedlejší produkty. Při spalování těchto paliv vznikají látky, které mají škodlivý vliv na životní prostředí a lidský organismus.

U některých látek vzniklých spalováním fosilních paliv a jejich derivátů je již bezpečně prokázána jejich škodlivost (oxid siřičitý, oxid uhelnatý, oxidy uhlíku atd.), u některých je škodlivost zatím předmětem zkoumání.

Jako větší problém než škodlivost látek se v současné době jeví skutečnost, že veřejnost je sice velmi dobře informována o škodlivých látkách, které při spalování fosilních paliv vznikají, jsou rovněž informováni i o možnostech omezení vlivu na životní prostředí, ale už jen málo lidí ví, že se při jejich spalování spotřebovává vzdušný kyslík, jehož zásoby bohužel nejsou nevyčerpatelné. Již v současné době je jeho vrstva v atmosféře relativně tenká a jeho hlavní zdroje (deštné pralesy v Jižní Americe, Asii a Africe) jsou systematicky likvidovány.

Ročně se spotřebuje asi 17 mld tun kyslíku a naopak se vyprodukuje asi 20 mld tun oxidu uhličitýho (údaje z roku 1990). Poměr kyslíku a oxidu uhličitýho v atmosféře se poměrně rychle mění v náš neprospěch a prognózy do dalších let nejsou příliš optimistické.

Co se týče plyných paliv, podílí se na světové produkci energie asi 20 %, ale na tvorbě emisí škodlivých látek se podílí pouze cca 2 %. Při spalování plyných paliv hlavně nevznikají úlety tuhých částic a díky možnosti dokonalého řízení spalovacího procesu je minimální i vznik oxidu uhelnatého.

Mezi základní složky spalin plyných paliv patří oxid uhličitý, dusík, vodní pára a kyslík. V domácnostech, průmyslových spotřebičích, kotlích a dalších spotřebičích dochází k tvorbě těchto látek:

- oxid uhelnatý
- oxidy dusíku
- oxidy síry
- benzyrenu
- formaldehydu

### **Limitní hodnoty škodlivých látek**

Zavádíme dva pojmy, podle kterých určujeme míru znečištění ovzduší, prostředí a obsah škodlivých látek ve spalinách atd:

- **Emisní limity**

Ukazují maximální dovolený obsah škodlivých látek odcházejících ze zdrojů znečištění, obvykle za normálních podmínek (0°C a 101 325 Pa) v mg/m.

- **Imisní limity**

Tyto limity určují maximální povolený obsah škodlivých látek ve volném ovzduší, obvykle v mikrogramech na m<sup>3</sup>.

### **Druhy škodlivých látek ve spalínách plynných paliv**

- **Oxid uhelnatý**

Je to silně toxický plyn, který se při vdechnutí váže na hemoglobin a tvoří tak karboxylhemoglobin, který už v relativně malém množství může způsobit smrt. Při lehce zvýšené koncentraci pocítíme bolest hlavy, závratě a hučení v uších.

Tato látka vzniká díky nedokonalému spalování uhlovodíkových složek v plynném palivu a je také přímo složkou některých plynných paliv. Jeho obsah v různých spotřebičích je limitován maximálními přípustnými hodnotami v příslušných normách.

- **Oxidy dusíku**

Ze všech možných forem jsou schopny existence pouze dva (NO- oxid dusnatý a NO<sub>2</sub>- oxid dusičitý), které se jinak nazývají jako "nitózní plny". Vznikají při spalování všech paliv se vzduchem při teplotě nad 1100°C.

- **Oxid siřičitý**

Vzniká při spalování plynných paliv a to jako vedlejší nebo jako hlavní produkt z uhlí. Je vysoce jedovatý, bezbarvý a dráždivý plyn.

- **Oxid uhličitý**

Není jedovatý, ale při vyšší koncentraci může být dráždivý. Do koncentrace 5000 ppm je možno jej několik hodin dýchat bez obtíží, při 30 000ppm se zvyšuje dechová frekvence, při 70 - 100 000 ppm dochází po několika minutách k bezvědomí a při vyšší koncentraci může dokonce způsobit smrt.

Nebyl původně řazen mezi škodlivé látky, ale podporuje tzv. "skleníkový efekt" a proto se v poslední době stal velkou hrozbou

- **Formaldehyd**

Jinak se mu také říká mravenčí aldehyd, metylaldehyd a vzniká spalováním plynných uhlovodíků při nižších teplotách, při styku plamene s chladnými plochami nebo při spalování plynných paliv s vysokým přebytkem spalovacího vzduchu ( $n > 1,5$ ).



### 3. Přehled průmyslových plynových hořáků

Hořák je jednou ze základních součástí spalovacích procesů. Je to zařízení, které umožňuje přeměnu chemické energie vázané v palivu na energii tepelnou. Proces probíhá díky smíchání paliva s okysličovadlem (většinou atmosférický vzduch). Z konstrukčního hlediska je třeba, aby hořák splňoval následující požadavky:

- schopnost zajistit kvalitní směšování reakčních látek - paliva a okysličovadla
- schopnost zajistit stabilní a trvalý zdroj hoření
- schopnost vytvořit určitý požadovaný tvar plamene a udržovat plamen v žádané oblasti.

Na základě několika faktorů lze hořáky dělit do různých skupin:

- podle způsobu přívodu okysličovadla
- podle způsobu tvorby spalovací směsi
- podle druhu spalovaného paliva

#### 3.1 Hořáky podle způsobu přívodu okysličovadla

Nejčastěji využívaná okysličovadla jsou: atmosférický vzduch (vzduch z okolí s obsahem kyslíku cca 21%), vzduch obohacený kyslíkem (obsah kyslíku více než 21%) nebo tam, kde je třeba vysokých teplot, užití čistého kyslíku.

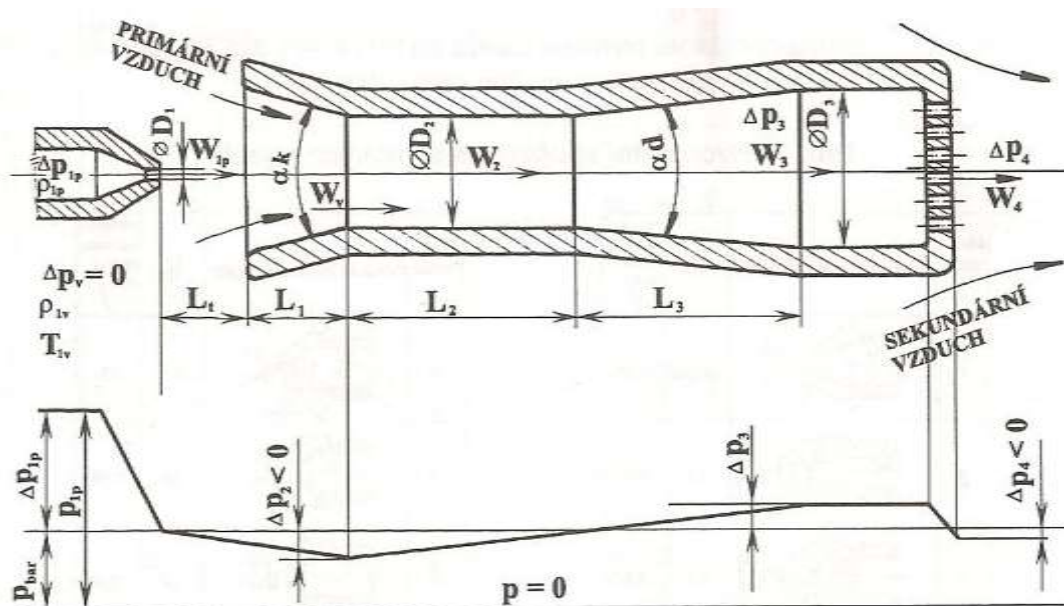
Okysličovadlo se do hořáku může přivádět dvěma způsoby. První způsob přívodu okysličovadla je pomocí ejekčního účinku. Druhý způsob je nucený přívod okysličovadla, který je zajištěn ventilátorem umístěným před hořákem.

##### 3.1.1 Hořáky s přívodem okysličovadla pomocí ejekčního účinku

Tyto hořáky nepotřebují ke své funkci zdroj spalovacího vzduchu. Spalovací vzduch je totiž nasáván do směšovače ejekčním účinkem paliva vytékajícího z trysky viz obrázek č.3.1.

Atmosférické hořáky najdeme ve většině domácností u plynových spotřebičů. Jedná se o nízkotlaké hořáky, které nasávají do směšovače pouze část celkového potřebného množství spalovacího vzduchu. Zbýlá část se přivádí tahem spotřebiče.

Injektorové hořáky najdeme většinou pro otop plynových pecí v průmyslu. Tyto hořáky jsou středotlaké a nasávají do směšovače veškerý potřebný spalovací vzduch díky vyššímu tlaku plynného paliva.



Obr.č.3.1 Ejekční hořák [12]

### Plynové trysky ejekčních hořáků:

Plynová tryska je místo, kde dochází k přeměně tlakové energie plynu na energii kinetickou. Existuje mnoho provedení trysek pro plynové hořáky, viz obr č. 3.2.

Tvar plynové trysky	$l/D_1$	Rychlostní součinitel plynové trysky $\varphi$	Tvar plynové trysky	$l/D_1$	Rychlostní součinitel plynové trysky $\varphi$
	$R_1=R_2=D_1$	0,97		1,5	0,9
	1,5	0,94		1,5	0,89
	1,5	0,92		1,5	0,87
	1,5	0,91		1,5	0,82
	1,5	0,905		0,5	0,75

Obr.č.3.2 Tvary plynových trysek [12]

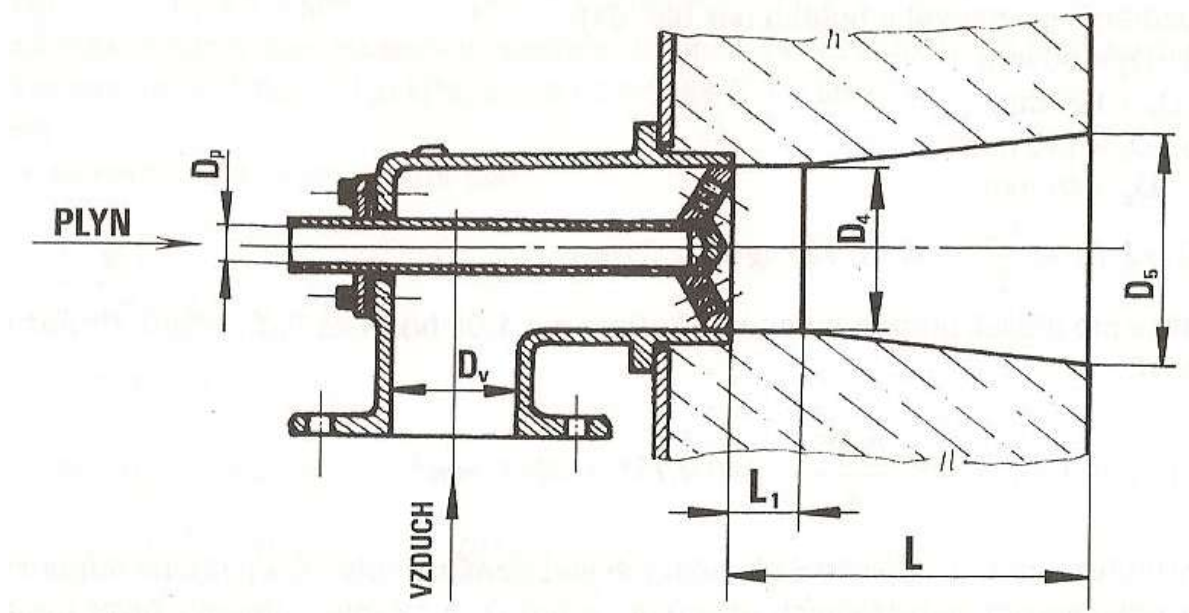
### 3.1.2 Hořáky s nuceným přívodem spalovacího vzduchu

Hořáky s nuceným přívodem spalovacího vzduchu se používají převážně u průmyslových pecí. Spalovací vzduch je většinou dopravován do hořáku radiálním ventilátorem. Tento vzduch je přiváděn buď studený, nebo předeheřtý.

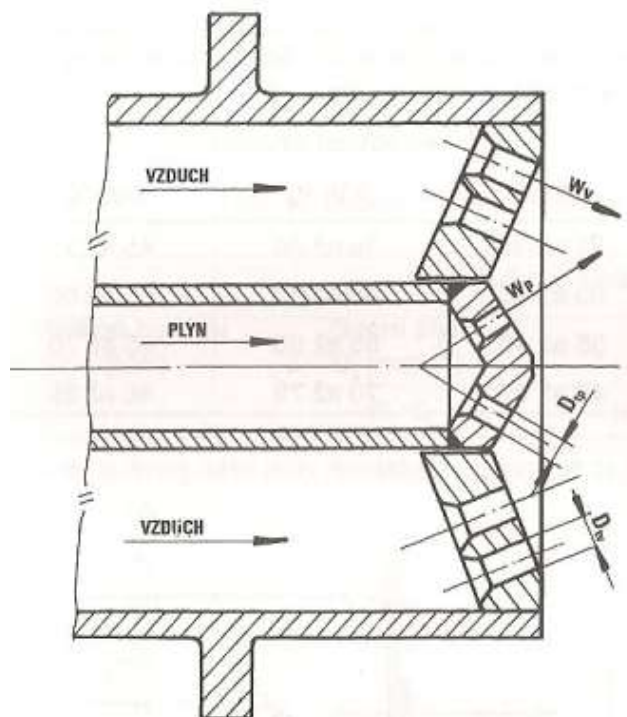
Podle tvaru a charakteru plamene dělíme tyto hořáky na:

- souproudé, dlouhoplamenné hořáky
- polovířivé hořáky se středně dlouhým plamenem
- vířivé hořáky s krátkým plamenem
- impulzní hořáky s vysokou rychlostí spalin
- sálavé hořáky
- sálavé trubky se spalováním v uzavřeném prostoru

Na obr.č.3.3 je znázorněn příklad konstrukčního uspořádání vířivého hořáku s nuceným přívodem spalovacího vzduchu. Plyné palivo je do hořáku přivedeno plynovým tělesem, které je zakončeno plynovou tryskou. Spalovací vzduch je přiveden vzduchovým potrubím a prochází hořákem až ke vzduchové trysce, která má dvě soustavy otvorů. Detaily plynové a vzduchové trysky vířivého hořáku jsou znázorněny na obrázku č.3.4. Poměr rychlostí v plynových a vzduchových tryskách k rychlostem v tělese hořáku je asi 10:1



Obr.č.3.3 Vířivý hořák s nuceným přívodem okysličovadla [12]



Obr.č.3.4 Detail uspořádání plynové a vzduchových trysek [12]

### 3.2 Hořáky podle způsobu tvorby spalovací směsi

Podle tohoto kritéria se hořáky dělí na hořáky s částečným smícháním paliva a okysličovadla a na hořáky s úplným smíšením paliva a okysličovadla před ústím hořáku.

#### 3.2.1 Hořáky s předmísenou směsí

U tohoto typu hořáků je směs paliva a okysličovadla připravena již před vstupem do spalovací zóny. Tvořená směs musí mít vyšší rychlost než jaká je rychlost spalování, v případě, že tomu tak není, je tu velké riziko, že plamen zašlehne do ústí hořáku a poškodí jej. Pro tuto kategorii hořáků je typický kratší a intenzivnější plamen. Díky tomu dosahuje vyšších teplot a umožňuje lepší přenos tepla zejména radiačním způsobem. Z bezpečnostních důvodů se v této kategorii vyskytují hlavně hořáky menších výkonových parametrů.

#### 3.2.2 Hořáky bez předmísení (difuzní)

Nejčastěji používaný typ hořáku. Plyn i okysličovadlo jsou přiváděny oddělenými přívody do tělesa hořáku a k jejich mísení dochází až v prostoru za hořákem, kde je směs zároveň spalována. Plamen závisí na několika faktorech: závisí na intenzitě směšování, poměru rychlostí vháněných plynů, počtu trysek hořáku a směrem jejich výstupu z hořáku. Dochází ke vzniku delšího plamene než u předchozího typu, to

zajišťuje rovnoměrnější rozložení teploty ve spalovacím prostoru, a také ke snížení teplotních maxim plamene. Používá se například u hořáku typu palivo-kyslík. Zabraňuje se vrácení plamene zpět do těla, tzv. prošlehnutí.

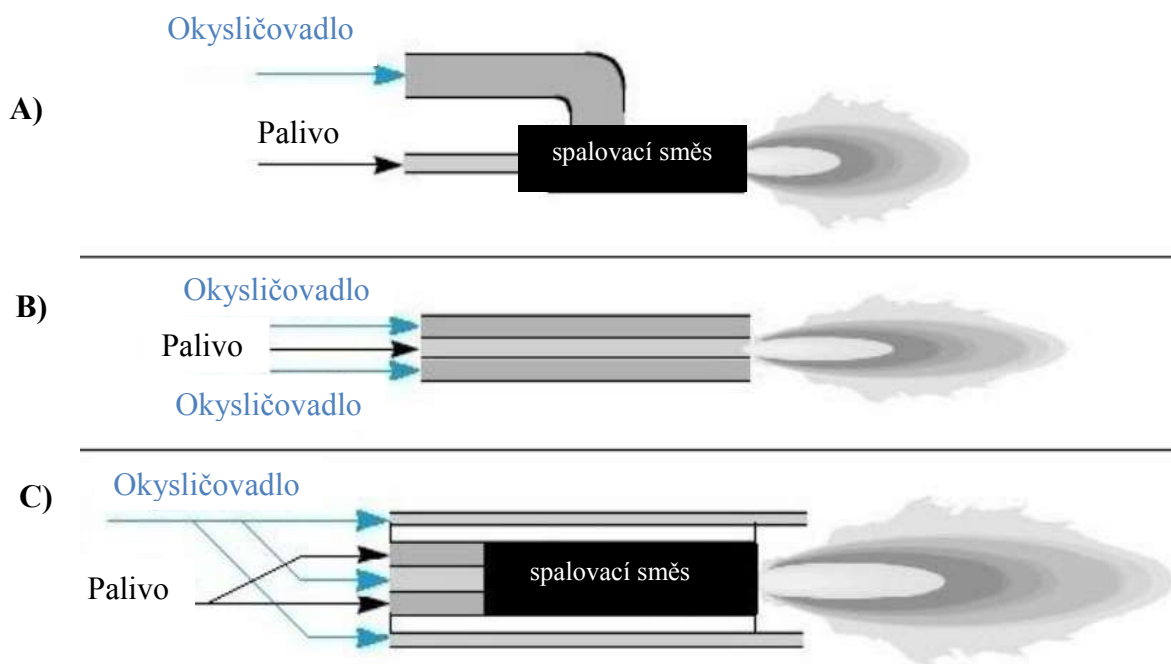
### 3.2.3 Hořáky s částečným předmísením

Jedná se o kombinaci předchozích dvou typů. Část paliva a okysličovadla je smísená před vstupem do topeniště a poté je do směsi vycházející z hořáku přimíseno další okysličovadlo. Vzniká tak stabilní hoření u ústí hořáku a sekundární přívod okysličovadla napomáhá proti prošlehnutí plamene do těla hořáku.

### 3.2.4 Hořáky s vícestupňovým přívodem okysličovadla/ paliva

Díky specifické konstrukci hořáku je umožněno, aby se spalovací směs utvářela postupně. U vícestupňového přívodu okysličovadla je část okysličovadla smísená s palivem (stechiometrický násobek okysličovadla bývá  $n < 1$ , což znamená, že v prvním stupni nedochází k úplnému spalování paliva) a zbytek okysličovadla je později přiváděn tryskami do oblasti plamene (sekundární či terciální trysky - záleží na počtu stupňů).

Hořák s vícestupňovým přívodem paliva funguje na obdobném principu jen s tím rozdílem, že ve stupních se dávkuje palivo. Tato metoda vede ke snížení teploty v jádru plamene a užívá se k potlačení tvorby oxidu dusíku.



Obr.č.3.5 Schematické rozdělení hořáků podle způsobu tvorby spalovací směsi [14]  
**a)** hořák s předmísenou směsí, **b)** difuzní hořák, **c)** hořák s částečným předmísením

### **3.3 Rozdělení hořáků podle typu paliva**

Na tvorbu spalovací směsi se užívá paliv ve všech skupenstvích popřípadě kombinace více druhů skupenství. Kombinace se většinou vybírá hlavně podle dostupnosti v dané oblasti. Někdy jedno z paliv může sloužit pouze jako záložní v případě, kdyby došlo k výpadku primárního zdroje. Podle počtu paliv rozlišujeme dvou palivové nebo více palivové hořáky.

#### **3.3.1 Hořáky na plynná paliva**

Díky jednodušší konstrukci, nižší ceny a geografické dostupnosti paliva se jedná o jeden z nejpoužívanějších typů hořáků. Další výhodou je i ekologičnost a šetrnost k životnímu prostředí. Oproti ostatním palivům obsahují plynná paliva méně škodlivých látek jako například síry a dusíku. Palivo je bez potřebného předchozího zpracování jednoduše přiváděno do ohniště pod požadovaným tlakem.

#### **3.3.2 Hořáky na kapalná paliva**

Hořáky na kapalná paliva jsou pouze s difuzním (bez předmísení) spalováním viz předchozí kapitola. Palivem nejčastěji bývá lehký topný olej (LTO), těžký topný olej (TTO), nafta a různé odpadní kapaliny vniklé jako vedlejší produkt během industriálních procesů.

Oproti předchozí kategorii musí být tento typ hořáků konstrukčně upraven tak, aby kapalné palivo na výstupu bylo rozprašeno na co nejmenší kapičky, které se musí během letu vypařit a shořet. Aby bylo rozprašení možné, používá se různých typů atomizace, u látek s vysokou viskozitou se používá předehevu, protože čím je teplota kapalných látek vyšší, tím je nižší viskozita a rozprašení paliva je snazší a kvalitnější. U některých hořáků je dokonce tento ohřev umožněn pomocí zabudovaného ohřívače paliva. Atomizace je nejčastěji prováděna následujícími metodami:

- tlakové rozprašování
- rozprašování pomocí atomizačního média - jako atomizační médium slouží nejčastěji tlakový vzduch nebo pára
- mechanické rozprašování - využívá odstředivé síly

#### **3.3.3 Hořáky na tuhá paliva**

Opět oproti hořákům na plynná paliva je potřeba konstrukčních úprav, protože palivo musí být před výstupem rozdrceno na prach nebo dostatečně malé části, aby během spalování došlo k jejich vyhoření.

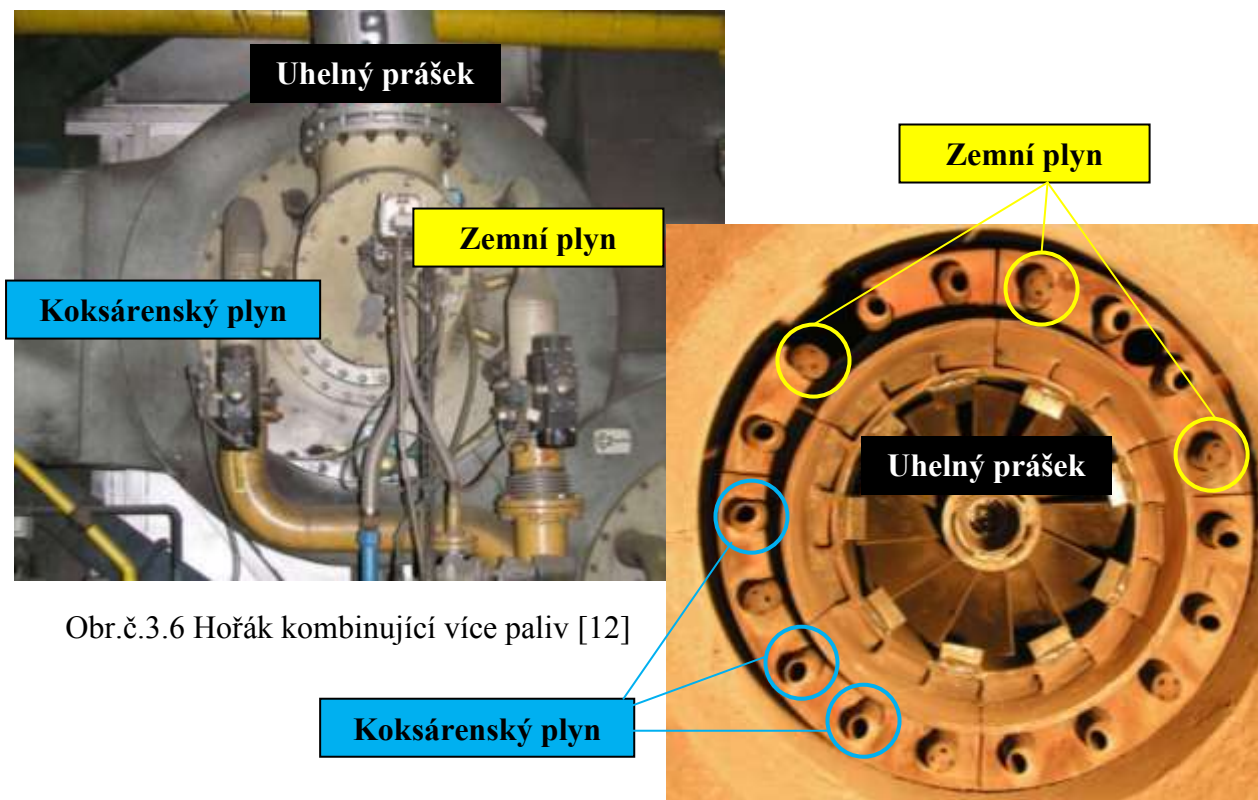


Nejčastěji se tento typ hořáků používá v průmyslu u výkonových hořáků, které jsou konstruovány speciálně pro daný typ topeniště. S tímto typem se můžeme setkat v cementárnách, vápenkách nebo často také na kotlích v tepelných elektrárnách.

Velkou nevýhodou hořáků na tuhá paliva je jejich neekologičnost, která je způsobena produkcí nadměrného množství škodlivých látek obsažených ve spalínách. Těmito látkami jsou hlavně oxidy dusíku, oxidy síry a tuhé znečišťující látky. Z výše zmíněných typů produkují hořáky na tuhá paliva nejvíce škodlivých látek a některá tuhá paliva mohou dokonce obsahovat nebezpečné chemické látky, které se procesem spalování mění na karcinogeny.

### 3.3.4 Kombinované a více palivové hořáky

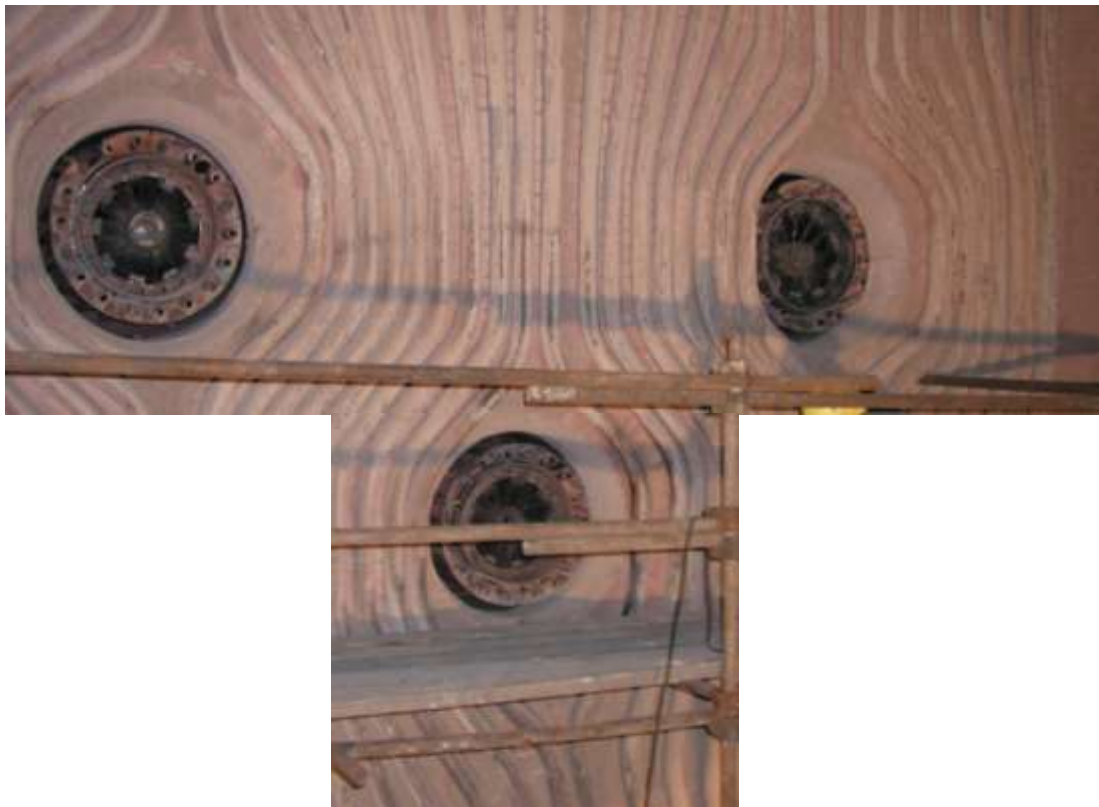
Velkou výhodou těchto typů je možnost spalování (tedy spalování více druhů paliv najednou) nebo možnost výměny druhu paliva (například hořák funguje na tuhá i plynná paliva s možností střídání těchto druhů) viz obr.č.3.6. Můžeme se tedy rozhodnout na druhu paliva podle aktuální ceny na trhu (vyberu si, co je výhodnější nakupovat a spalovat). Poskytuje, ale nejen výhody ekonomické, ale i technologické - jako využití kombinace vlastností různých druhů paliv nebo efektivní zabezpečení funkčnosti i v případě odstávky některého z paliv.



Obr.č.3.6 Hořák kombinující více paliv [12]

#### 4. současný stav kotle K2

V současné době kotel K2 disponuje třemi kombinovanými hořáky typu „STORK Thermeg“, které jsou umístěny v přední stěně kotle (viz.obr.č.4.1). Jejich konstrukce je navržena tak, aby spalovali 100 % černého uhlí a při stabilizaci cca. 25 % zemního nebo koksárenského plynu. Výkon hořáku při spalování černého uhlí je 21,7MW a při spalování plynu 5,4MW.



Obr.č.4.1 Tři čelní hořáky na kotli K2 [4]

Záměrem společnosti Veolia Energie ČR, a.s. je úprava kotle K2 tak, aby byla zajištěna 100 % záloha pro kotel K1 nebo K4. Kotel K2 by měl být po úpravě schopen spalovat stejné množství koksárenského plynu jako kotle K1 a K4. Množství koksárenského plynu, které je ve smlouvě se společností OKK, Koksovny, a.s. (Koksovna Svoboda) je 15 000 Nm<sup>3</sup>/hod. Toto množství plynu je Teplárna Přívoz schopna spálit pouze při provozu obou kotlů K1 a K4 současně. Z tohoto důvodu nemohou být v letním období prováděny plánované ani nahodilé odstávky za účelem údržby kotlů. Následná úprava kotle K2 zajistí 100% zálohu kotlům K1 a K4 se spalováním koksárenského plynu a díky tomu pak na kotlích K1 a K4 budou moci probíhat nahodilé i plánované odstávky.



## 4.1 Popis kotle K2

Jedná se o strmotrubnatý dvoutahový granulační kotel se sálavým konvekčním přehřívákem. Součástí kotle jsou ohřívák vody (ekonomizér) a kapsový ohřívák vzduchu. Spalovací vzduch se nasává z kotelny dvěma ventilátory, dále proudí přes ohřívák vzduchu do kotle.

Hlavním palivem je černé uhlí, které se spaluje ve třech čelních hořácích. Pro najíždění a stabilizaci hoření se používá koksárenský nebo zemní plyn. Přebytek vzduchu se pohybuje kolem 1,25 až 1,3 násobku množství vzduchu potřebného k ideálnímu vyhoření všech spalitelných látek obsažených v palivu.

Za kotlem se nachází elektrostatický odlučovač, který slouží k odlučování popílku ve spalínách. Rovnotlaký kouřový ventilátor odsává tyto spaliny do komína. V TPV je jeden komín společný pro všechny kotle. Ve spodní části spalovací komory jsou dvě výsypky, kterými se odvádí struska přes drtiče. Spalovací komora je zakrytá betonovým stropem. Vyzdívka je tvořena šamotovými tvarovkami. Vnější izolaci kotle tvoří izolační matrace a oplechování. Chlazení všech čtyř stěn spalovací komory je realizováno trubkami.

### 4.1.1 Technické parametry kotle

Jmenovitý výkon:	49,7	MW (67 t/h)
Minimální výkon:	18,5	MW (25 t/h)
Jmenovitý přetlak páry:	7,65	MPa
Konstrukční přetlak páry:	8,3	MPa
Jmenovitá teplota přehřáté páry:	485 ± 8	°C
Maximální teplota přehřáté páry:	500	°C
Teplota napájecí vody:	160	°C

### 4.1.2 Technické parametry hořáku

Počet hořáků:	3	
Značka:	STORK	
Regulační rozsah na jeden hořák (uhlí):	1,75:1	
Regulační rozsah na jeden hořák (ZP):	4:1	
Regulační rozsah na jeden hořák (KP):	3,5:1	
Výkon hořáku (spalování uhlí):	21,7	MW

Výkon hořáku (spalování plynu):	5,4	MW		
Množství prášku na hořák:	0,904	kg·s <sup>-1</sup>		
Množství ZP na hořák:	0,152	Nm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	547	Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>
Množství KP na hořák:	0,329	Nm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	1184,4	Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>
Zapalovací hořáky:	plynové/elektrické			
Množství plynu na 1 zapalovací hořák:	0,0056	Nm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>		
Záměna topných plynů je možná bez vypnutí hořáku.				

## 4.2 Paliva používaná na kotli K2 a jejich parametry

### 4.2.1 Černé uhlí a proplástek

Černé uhlí a proplástek (uhlí nižší kvality) jsou hlavním palivem pro tři čelní kombinované vířivé hořáky. Skladují se ve dvou zásobnících s obsahem 2x240 tun uhlí. Dále je černé uhlí dopravováno do tří-kroužkových levotočivých mlýnů. Zde dochází k rozemletí uhlí na černouhelný prach a nosným médiem (vzduchem) je tento prach foukán přímo do hořáků. Výkon mlýnu je 4,5 t/h a teplota sušícího vzduchu se pohybuje kolem 150 – 180 °C.

#### Parametry černého uhlí:

- Výhřevnost paliva:  $Q_r^i = 22,5 \div 27,5$  MJ·kg<sup>-1</sup>
- Obsah vody v surovém palivu:  $W^r = 9 \div 12$  %
- Obsah popeloviny v surovém palivu:  $A^r = 12 \div 18$  %
- Obsah síry v surovém palivu:  $S_m^r = \max. 0,25$  g·MJ<sup>-1</sup>

#### Parametry proplásku:

- Výhřevnost paliva:  $Q_r^i = 16,5 \div 22,5$  MJ·kg<sup>-1</sup>
- Obsah vody v surovém palivu:  $W^r = 7 \div 13$  %
- Obsah popeloviny v surovém palivu:  $A^r = 19 \div 49$  %
- Obsah síry v surovém palivu:  $S_m^r = \max. 0,31$  g·MJ<sup>-1</sup>

#### 4.2.2 Zemní plyn a Koksárenský plyn

Zemní a koksárenský plyn se používají jako zapalovací a stabilizační palivo pro tři čelní kombinované vířivé hořáky (viz. obr. č. 4.2). Koksárenský plyn je hlavním stabilizačním palivem. Plynové hořáky se regulují škrcením tlaku v přívodním potrubí. Platí, že škrcení musí probíhat současně na všech hořácích, ale samostatně pro zemní plyn a pro koksárenský plyn. Bez odstavení hořáku lze přecházet ze zemního plynu na koksárenský a naopak, ale nelze spalovat tyto dva plyny současně.



Obr.č.4.2 Hořák v provozu na koksárenský plyn [4]

##### Parametry zemního plynu:

- Výhřevnost paliva:  $Q_i^r = 34$  MJ·Nm<sup>-3</sup>
- Spalné teplo:  $Q_h^r = 38$  MJ·Nm<sup>-3</sup>
- Přetlak na rozdělovači:  $p = 5$  kPa
- Teplota plynu:  $t = 10$  °C
- Hustota:  $\rho = 0,696$  kg·m<sup>-3</sup>
- Složení:
  - Metan  $\text{CH}_4$  88,3 %
  - Etan  $\text{C}_2\text{H}_6$  3,1 %
  - Propan  $\text{C}_3\text{H}_8$  3,0 %

➤ Butan	$C_3H_{10}$	0,2	%
➤ Kyslík	$O_2$	0,5	%
➤ Dusík	$N_2$	4,9	%

- Mez výbušnosti ve směsi se vzduchem: dolní – 5 %    horní – 15 %

#### **Parametry koksárenského plynu:**

- Výhřevnost paliva:  $Q_r^i = 15,65 \text{ MJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$
- Spalné teplo:  $Q_n^r = 17,85 \text{ MJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$
- Přetlak p na rozdělovači:  $2 \div 3 \text{ kPa}$
- Teplota plynu:  $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$
- Hustota:  $\rho = 0,497 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Složení:
 

➤ Vodík	$H_2$	54	%
➤ Metan	$CH_4$	26,5	%
➤ Oxid uhelnatý	$CO$	6,2	%
➤ Oxid uhličitý	$CO_2$	2,2	%
➤ Dusík	$N_2$	10,6	%
➤ Kyslík	$O_2$	0,5	%

Mez výbušnosti ve směsi se vzduchem:    dolní – 4,5 %    horní – 33,8 %

### **4.3 Popis plynového hospodářství teplárny**

Spalovací zařízení instalované v TPV jsou 4 vysokotlaké kotle K1 až K4, jejichž výrobcem jsou Vítkovice a.s. Jedná se o strmotrubnaté práškové kotle s granulačním ohništěm. Jmenovitý výkon jednoho kotle je 67,8 t/h (49,7 MW) o tlaku 7,65 MPa a teplotě přehřáté páry 485°C. Hlavním palivem je černouhelný prach. Jako stabilizační médium se používá koksárenský nebo zemní plyn. Hořáky na kotlích K2 a K3 jsou konstrukčně upraveny pro spoluspalování koksárenského plynu a černouhelného prachu. Výkon těchto plynových hořáků lze regulovat změnou (škrcením) tlaku v přívodním potrubí pro všechny hořáky současně, ale zároveň samostatně pro koksárenský a zemní plyn.

#### **4.3.1 Přívod koksárenského plynu**

Koksárenský plyn je do kotelny přiváděn dvěma plynovými řádý SA a SB o světlosti DN500. Napojení těchto řádů na OKK, Koksovny, a.s. je provedeno šoupátky

č. 1 (SB) a č. 2 (SA). Tato šoupátka zároveň fungují jako hlavní uzávěry plynu pro TPV. Šoupátka DN40, které slouží pro odvod kondenzátu z potrubí jsou umístěny za hlavními uzávěry plynu. Následují ventily DN25 pro připojení páry, dále měřicí clony a za nimi je další odvod kondenzátu pomocí šoupátek DN40. Před a za měřicí clonou je přívod páry ventily DN25. Kondenzát se odvádí do společného kapáku, který patří OKK, Koksovny, a.s. Konce obou plynových řádů jsou opatřeny odvzdušněním DN40. Odvod kondenzátu do kapáku je na konci obou řádů. Ke každému kotli pak vedou z plynových řádů přípojky DN400 přes dvojici šoupátek DN400. Za těmito šoupátky se pak jedna větev napojuje na druhou.

#### **4.3.2 Přívod zemního plynu**

V kotelně je zemní plyn napojen na rozvodnou komoru hlavního řádu DN 250 v kotelně. Na hlavním řádu rozvodu zemního plynu je také umístěn hlavní uzavírací ventil.

## 5. Návrh úprav pro kotel K2

Cílem úprav na kotli K2 je, aby tento kotel mohl být provozován pouze na koksárenský plyn do maximálního výkonu 40 MW a také aby mohl být provozován v režimu spoluspalování koksárenského plynu a uhlí. Po úpravě kotle K2 by měl být tento kotel schopen zajistit 100% zálohu pro kotel K1 nebo K4.

Navržená úprava spočívá v zachování 3 stávajících čelních vířivých hořáků typu STORK a instalaci 2 nových hořáků pouze na koksárenský plyn o vyšším výkonu do bočních stěn spalovací komory.

S ohledem na skutečnost, že na stávajících čelních hořácích bude zachována možnost jejich provozu na zemní plyn, navrhuji, aby 2 nové hořáky byly provedeny jako jednopalivové pro spalování koksárenského plynu.

Při minimální výhřevnosti koksárenského plynu  $14,7 \text{ MJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$  a maximálním spalovaném množství koksárenského plynu  $0,329 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  vychází tepelný výkon jednoho čelního vířivého hořáku  $4,84 \text{ MW}_t$ . Tudíž celkový tepelný výkon kotle při provozu třech čelních hořáků potom vychází cca  $14,52 \text{ MW}_t$ . Požadovaný maximální výkon kotle při provozu čistě na KP je  $40 \text{ MW}_t$ . Při účinnosti kotle 90% je nutné přivést do kotle celkový tepelný příkon v koksárenském plynu  $44,4 \text{ MW}_t$ . Za těchto předpokladů by měly mít navržené plynové hořáky  $2 \times 15 \text{ MW}_t$ .

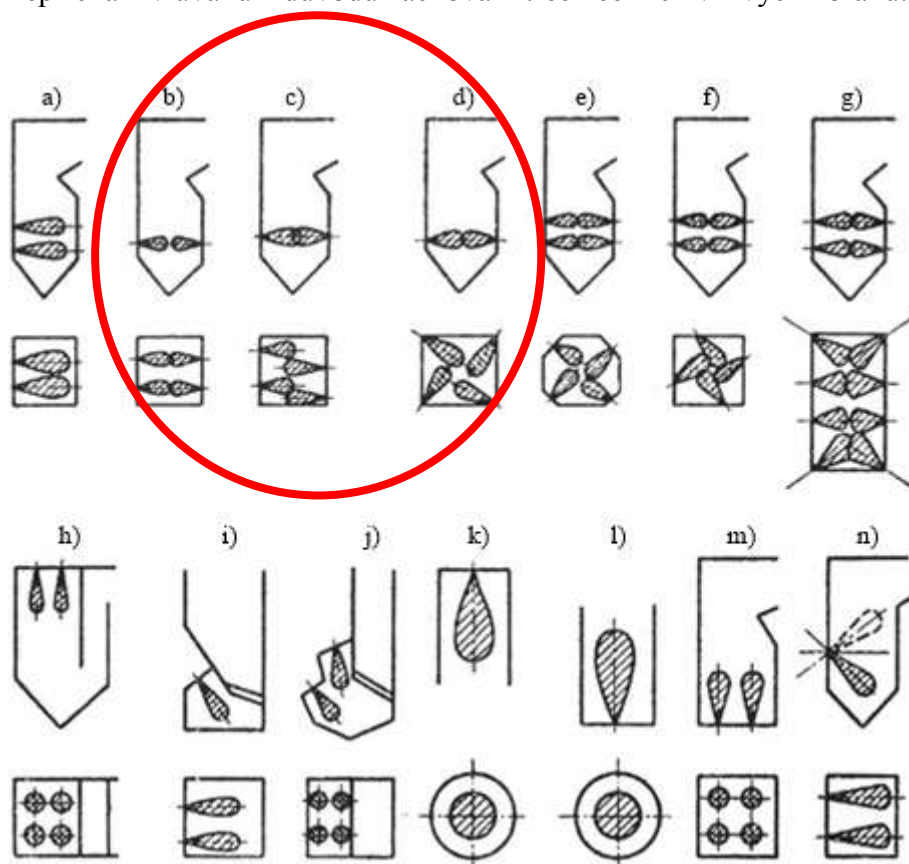
Pro tento návrh úprav zůstane zachován stávající přívod a hlavní uzávěr koksárenského plynu na kotelně  $2 \times \text{DN } 400$  včetně armatur. Nově bude třeba nainstalovat navazující potrubí DN 500 od místa spojení s potrubím DN 400 až po napojení na stávající rozvod DN 300 u výkonové stanice koksárenského plynu před plynovými hořáky. Dále bude třeba instalovat nové přívodní potrubí KP DN 350 pro dva nově instalované plynové hořáky. Potrubí se napojí na stávající odvodnění a odvzdušnění, včetně uzemnění. Co se týká rozvodů zemního plynu, tak to zůstane kompletně zachováno.

Náklady související s navrhovanými úpravami jsou odhadnuty ve výši cca 10 000 000 Kč. Odhad nákladů je proveden z úprav palivového hospodářství, úprav vzduchospalinového traktu, vyzdívky, nátěry, ocelové konstrukce a demontáže. Dále pak z měření, regulace a kompletních montážních prací.

## 5.1 Umístění hořáků na kotli

Pro umístění nově instalovaných plynových hořáků do prostoru spalovací komory je třeba respektovat aktuální rozmístění stávajících čelních hořáků. Je třeba splnit požadavky přiměřené rovnoměrnosti teplotního pole při různé konfiguraci provozovaných hořáků.

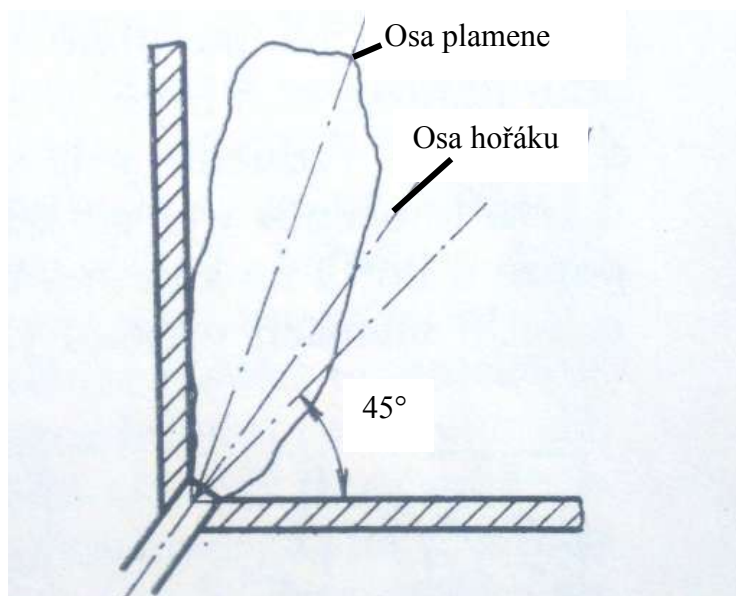
Umístění hořáků ve spalovací komoře může být realizováno mnoha způsoby viz obr č.5.1. V případě instalace navrhovaných plynových hořáků lze brát v úvahu pouze tři možnosti umístění hořáků (b, c, d) viz naznačení na obr č.5.1. Jiná koncepce umístění hořáků nepřichází v úvahu z důvodu zachování třech čelních vířivých hořáků.



Obr.č.5.1 Varianty umístění hořáků na kotlích [3]

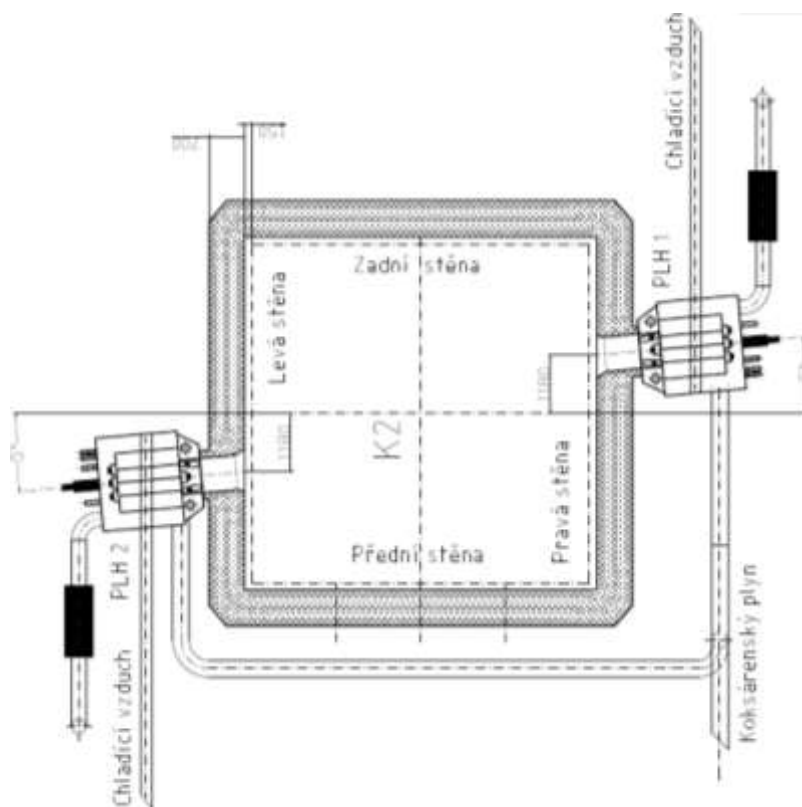
a) dvouřadé čelní ; b) jednořadé protiběžné ; c) jednořadé vystřídané ; d) jednořadé rohové (tangenciální) ; e) dvouřadé rohové (tangenciální) ; f) dvouřadé rohové (tangenciální) ; g) dvouřadé kombinované ; h, k) stropní ; i, j) uspořádání v čelní stěně u výtavných ohnišť ; l) naklápěcí

Umístění hořáků v rozích ohniště (varianta d na obr.č.5.1) nedoporučuji, protože vlivem nesymetrických aerodynamických poměrů v plameni by se plamen mohl přiklánět na stěnu, se kterou svírá osa plamene menší úhel viz obr č.5.2. Jako důsledek tohoto jevu by mohlo vést k zastruskování ohniště.



Obr.č.5.2 Přiklonění plamene na stěnu v ohništi při rohovém umístění hořáku [3]

Umístění hořáku, které navrhuji je umístění jednořadé vystřídané (varianta c na obr.č.5.1). Toto umístění hořáků by mělo nejméně ovlivnit rovnoměrnost teplotního pole. Umístění hořáku, které navrhuji je naznačeno jak na obrázku č.5.3, tak na výkresu číslo 2, který je přílohou této diplomové práce.



Obr.č.5.3 Navrhované umístění hořáků na kotli [Příloha č.2]



Z důvodu výkonového rozložení hořáků nebude možné docílit ideálních poměrů při dosažení rovnoměrného teplotního pole. V každé boční stěně je instalován jeden nový plynový hořák o výkonu 15 MWt, naproti tomu v přední stěně jsou umístěny tři hořáky o výkonu 3 x 5 MWt. V bočních stěnách nejsou hořáky umístěny přímo naproti sobě, ale na levé straně je hořák umístěn blíže přední stěně a naopak na pravé straně je hořák blíže zadní stěně. Vliv bude mít i umístění os hořáků, které budou odkloněny vůči kolmici k boční stěně kotle o 5°. Pokud bude v nových hořácích provozně upřednostněno spalování koksárenského plynu, tak při samotném provozu bude docházet k určité rotaci teplotního pole ve spalovací komoře což umožní lepší vyplnění spalovací komory a plameny hořáků se nebudou vzájemně ovlivňovat. Nové hořáky budou mít víříče navrženy tak, aby plamen neovlivňoval protější stěny spalovací komory.

Pro instalaci nových plynových hořáků budou provedeny výhyby v bočních stěnách spalovací komory a to v levé boční stěně u přední stěny spalovací komory a v pravé boční stěně u zadní stěny spalovací komory. Otvor bude vytvořen vyhnutím 2x7 trubek na každé stěně.

## 6. Výpočty

### 6.1 Výpočet účinnosti kotle pro spalování koksárenského plynu

Spalování probíhá s přebytkem vzduchu  $n=1,675$  a hustota plynu je  $0,497$ .  
Výhřevnost koksárenského plynu je  $16\,700 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$ .

Hodnoty potřebné pro výpočet	
Jmenovitý výkon kotle	40 [MW]
Obsah $O_2$ ve spalinách	8,6 [%]
Teplota spalin	113,6 [°C]
Naměřený objemový podíl CO ve spalinách	0 [ppm]

#### 6.1.1 Stechiometrie

Objemové složení koksárenského plynu podle analýzy z koksovny svoboda

Složka	[%]
$H_2$	54,9
$CH_4$	25,8
$C_nH_m$	2,7
CO	5,9
$CO_2$	2,6
$N_2$	7,6
$O_2$	0,5

#### Výpočet množství spalovacího vzduchu

$$V_{O_2} = \left[ \left( x + \frac{y}{4} \right) \cdot C_x H_y \right] + 3,8 \cdot C_m H_n + 0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 1,5 \cdot H_2S - O_2 \quad (1)$$

$$V_{O_2} = 2 \cdot CH_4 + 3,8 \cdot C_m H_n + 0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 - O_2$$

$$V_{O_2} = 2 \cdot 0,258 + 3,8 \cdot 0,027 + 0,5 \cdot 0,059 + 0,5 \cdot 0,549 - 0,005$$

$$V_{O_2} = \mathbf{0,9176} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$$

$$V_{VZ;t}^S = \frac{V_{O_2}}{0,21} = \frac{0,9176}{0,21} = \mathbf{4,37} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (2)$$

$$V_{VZ;SK}^S = V_{VZ;t}^S \cdot n = 4,37 \cdot 1,675 = \mathbf{7,32} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (3)$$

#### Výpočet množství vzniklých spalin

$$V_{CO_2} = CO + CO_2 + \sum x \cdot C_x H_y + 2,6 \cdot C_m H_n \quad (4)$$

$$V_{CO_2} = CO + CO_2 + CH_4 + 2,6 \cdot C_m H_n$$

$$V_{CO_2} = 0,059 + 0,026 + 0,258 + 2,6 \cdot 0,027 = \mathbf{0,4132} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$$

$$V_{H_2O} = H_2 + \sum \frac{y}{2} \cdot C_x H_y + 2,4 \cdot C_m H_n + H_2 S + (v - 1) \cdot V_{VZ;SK}^S \quad (5)$$

$$V_{H_2O} = H_2 + 2 \cdot C H_4 + 2,4 \cdot C_m H_n$$

$$V_{H_2O} = 0,549 + 2 \cdot 0,258 + 2,4 \cdot 0,027 = \mathbf{1,13} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{VZ;t}^S = 0,21 \cdot (1,675 - 1) \cdot 4,37 = \mathbf{0,62} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (6)$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_{VZ;t}^S + N_2 = 0,79 \cdot 4,37 + 0,076 = \mathbf{3,53} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (7)$$

$$V_{SP;t}^S = V_{CO_2} + V_{N_2} = 0,4132 + 3,53 = \mathbf{3,943} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (8)$$

$$V_{SP;SK}^S = V_{SP;t}^S + (n - 1) \cdot V_{VZ;t}^S = 3,943 + (1,675 - 1) \cdot 4,37 \quad (9)$$

$$V_{SP;SK}^S = \mathbf{6,89} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$$

$$V_{SP;SK}^V = V_{SP;SK}^S + V_{H_2O} = 6,89 + 1,13 = \mathbf{8,02} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (10)$$

### Složení spalin

#### 1) Vlhké spaliny

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100 = \frac{0,4132}{8,02} \cdot 100 = \mathbf{5,152} [\%]$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100 = \frac{1,13}{8,02} \cdot 100 = \mathbf{14,09} [\%]$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100 = \frac{0,62}{8,02} \cdot 100 = \mathbf{7,73} [\%]$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2} + 0,79 \cdot (n - 1) \cdot V_{VZ;t}^S}{V_{SP;SK}^V} \cdot 100$$

$$N_2 = \frac{3,53 + 0,79 \cdot (1,675 - 1) \cdot 4,37}{8,02} \cdot 100 = \mathbf{73,07} [\%]$$

#### 2) Suché spaliny

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{SP;SK}^S} \cdot 100 = \frac{0,4132}{6,89} \cdot 100 = \mathbf{5,997} [\%]$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{SP;SK}^S} \cdot 100 = \frac{0,62}{6,89} \cdot 100 = \mathbf{8,999} [\%]$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2} + 0,79 \cdot (n - 1) \cdot V_{VZ;t}^S}{V_{SP;SK}^S} \cdot 100$$

$$N_2 = \frac{3,53 + 0,79 \cdot (1,675 - 1) \cdot 4,37}{6,89} \cdot 100 = \mathbf{85,055} [\%]$$

### 6.1.2 Výpočet tepelných ztrát

Při výpočtu účinnosti v provozu pouze na koksárenský plyn budu počítat pouze se ztrátou fyzickým teplem spalin a se ztrátou sdílením tepla do okolí.

### Přivedené teplo v 1 m<sup>3</sup> paliva

$$Q_{in} = Q_i^r + \Delta Q_{POV} + \Delta Q_{pal} + \Delta Q_{sr} \quad [kJ \cdot m^{-3}] \quad (11)$$

$\Delta Q_{POV}$  teplo přivedené předehřevem spalovacího vzduchu

$\Delta Q_{pal}$  teplo přivedené předehřevem paliva

$\Delta Q_{sr}$  teplo přivedené recirkulací spalin

$$Q_{in} = 16\,700 + 0 + 0 + 0 = \mathbf{16\,700} \quad [kJ \cdot m^{-3}]$$

### Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta)

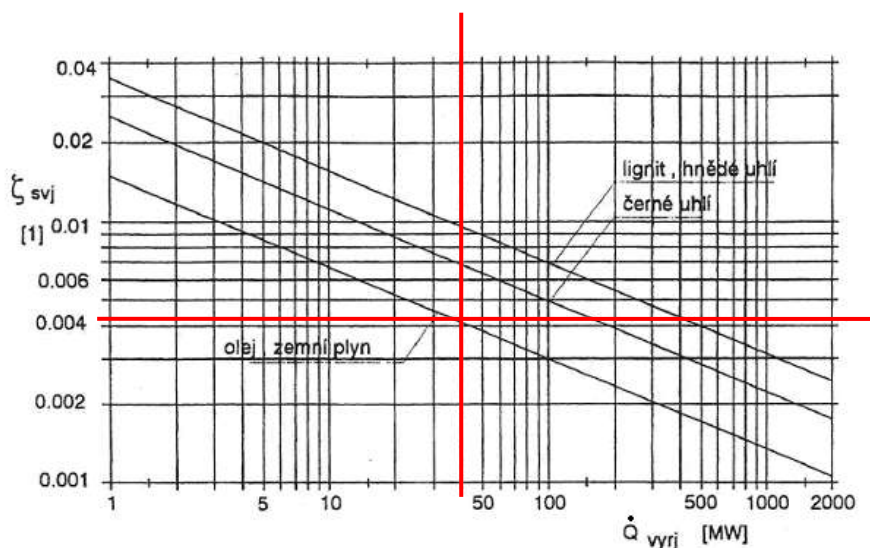
Představuje jednu z největších ztrát kotle. Je určena tepelnou energií odcházejících spalin.

$$Z_k = \frac{V_s \cdot \bar{c}_s \cdot (t_k - t_0)}{Q_{in}} = \frac{8,02 \cdot 1,44 \cdot (113,6 - 20)}{16\,700} = 0,0647 \quad (12)$$

$$Z_k = 0,059116 \cdot 100 = \mathbf{6,47} \quad [\%]$$

### Ztráta sdílením tepla do okolí

Závislost ztráty sdílením tepla do okolí na výkonu kotle a druhu paliva je znázorněna na obr.6.1



Obr.6.1 Závislost ztráty sdílením tepla do okolí na výkonu kotle

$$Z_{sv} = Z_{svj} = 0,00423$$

$$Z_{sv} = 0,00423 \cdot 100 = \mathbf{0,423} \quad [\%]$$

### Konečný výpočet účinnosti

$$\eta = 1 - Z_k - Z_{sv} \quad (13)$$

$$\eta = 1 - 0,0647 - 0,00423 = 0,931$$

$$\eta = \mathbf{93,1 \text{ [\%]}}$$

## 6.2 Návrh plynových hořáků

Základním údajem pro návrh hořáků je množství plynu, které musí Teplárna Přívoz odebrat od koksovny Svoboda. Celkem toto množství činí 15 000 Nm<sup>3</sup>/hod. Toto množství připadá na spalování ve dvou kotlích. Tedy na jeden kotel připadá množství 7 500 Nm<sup>3</sup>/hod. Navrhované hořáky, které musí být schopné toto množství spálit budou dva. Tudíž výsledné množství plynu na jeden hořák je 3 750 Nm<sup>3</sup>/hod.

Výhřevnost koksárenského plynu se pohybuje v rozmezí 14,7 až 18 MJ/Nm<sup>3</sup>. Návrh budu provádět pro minimální výhřevnost 14,7 MJ/Nm<sup>3</sup> a předpokládám, že pod tuto hodnotu výhřevnost paliva nikdy neklesne.

### 6.2.1 Výpočet výkonu jednoho hořáku

- Množství koksárenského plynu  $V_{plyn} = \mathbf{3\,750\,Nm^3/hod}$
- Výhřevnost  $Q_i^r = \mathbf{14,7\,MJ/Nm^3}$

$$P = \frac{V_{plyn} \cdot Q_i^r}{3600} = \frac{3\,750 \cdot 14\,700}{3\,600} = 15\,312,5 \text{ kWt} \quad (14)$$

Z výsledku pro výkon navrhují **2 hořáky 2 x 15 MWt**.

Přepočet skutečného množství koksárenského plynu na jeden hořák o výkonu 15 MW:

$$P = \frac{V_{plyn} \cdot Q_i^r}{3600} \Rightarrow V_{plyn} = \frac{P \cdot 3600}{Q_i^r} = \frac{15\,000 \cdot 3600}{14\,700} = \mathbf{3\,673,5\,Nm^3/hod}$$

Regulační rozsah plynového hořáku na koksárenský plyn je **44 – 100 %**.

15 000 kW ..... 100%

6 600 kW ..... 44%

Výpočet minimálního průtoku koksárenského plynu přes jeden hořák (při 44% výkonu):

$$V_{plyn,min} = \frac{P \cdot 3600}{Q_i^r} = \frac{6\,600 \cdot 3600}{14\,700} = \mathbf{1\,616\,Nm^3/hod}$$

### 6.2.2 Výpočet meze zápalnosti (výbušnosti) koksárenského plynu

Pro stanovení meze zápalnosti koksárenského plynu ve směsi se vzduchem použijí průměrné hodnoty jednotlivých složek plynu a meze zápalnosti jednotlivých hořlavých složek podle ČSN 38 6405 viz tabulka č.6.1.

Složka KP	Objemový podíl v KP [%]	$L_{iD}$ – dolní mez podle ČSN 38 6405	$L_{iH}$ – horní mez podle ČSN 38 6405
Vodík $H_2$	54,9	4	74,2
Metan $CH_4$	25,8	5	15
Uhlovodíky $C_nH_m^*$	2,7	2,75	28,6
CO	5,9	12,5	74,2
Kyslík $O_2$	0,5	-	-
$CO_2$	2,6	-	-
Dusík $N_2$	7,6	-	-

Tabulka č.6.1 meze zápalnosti jednotlivých složek

\* Za meze zápalnosti  $C_mH_n$  jsou použity hodnoty meze zápalnosti  $C_2H_4$

Pro výpočet meze zápalnosti použijí Le Chatelierovu rovnici (15)

$$L_{D(H)} = \frac{100}{\sum \frac{c_i}{L_{iD(H)}} + \frac{m}{100}} [\%] \quad (15)$$

$L_{iD(H)}$  ...dolní, resp. horní meze zápalnosti jednotlivých hořlavých složek plynu

$c_i$  ...objemový podíl příslušné hořlavé složky paliva

$m$  ...součet objemových podílů inertních složek v palivu

$$L_D = \frac{100}{\frac{54,9}{4} + \frac{25,8}{5} + \frac{2,7}{2,75} + \frac{5,9}{12,5} + \frac{0,5 + 2,6 + 7,6}{100}} = 4,9 [\%]$$

$$L_H = \frac{100}{\frac{54,9}{74,2} + \frac{25,8}{15} + \frac{2,7}{28,6} + \frac{5,9}{74,2} + \frac{0,5 + 2,6 + 7,6}{100}} = 36,5 [\%]$$

Výsledky ukazují mez výbušnosti ve směsi se vzduchem: **dolní – 4,9 % horní – 36,5 %**

### 6.2.3 Výpočet spalovací rychlosti KP

Stanovení spalovací rychlosti bývá značně nepřesné, neboť jednotlivé složky plynného paliva dosahují maximálních hodnot spalovacích rychlostí při rozdílných

násobcích stechiometrického objemu spalovacího vzduchu  $n$ . Já použiji pro stanovení maximální spalovací rychlosti Le Chatelierovu rovnici (16) a tabulku rychlostních faktorů příslušných složek paliva (viz.tab.č.6.2).

$$u_n = 0,0346 \cdot \frac{\sum r_i \cdot f_i}{V_{VZ;t}^S + 1 + 5 \cdot r_j - 18,8 \cdot r_{O_2}} [m \cdot s^{-1}] \quad (16)$$

kde značí...  $r_i$  ...objemové podíly jednotlivých hořlavých složek paliva

$f_i$  ...rychlostní faktory příslušných složek paliva (viz.tab.č.6.2)

$r_j$  ...objemový podíl inertů v palivu

$r_{O_2}$  ...objemový podíl kyslíku v palivu

$V_{VZ;t}^S$  ...stechiometrický objem spalovacího vzduchu

Složka KP	Objemový podíl v KP [%]	Rychlostní faktor $f_i$
Vodík $H_2$	54,9	267
Metan $CH_4$	25,8	131
Uhlovodíky $C_nH_m^*$	2,7	348
CO	5,9	19
Kyslík $O_2$	0,5	$r_{O_2} = 0,005$
CO <sub>2</sub>	2,6	$r_j = 0,102$
Dusík $N_2$	7,6	$r_j = 0,102$

Tabulka č.6.2 rychlostní faktory složek paliva

$$u_n = 0,0346 \cdot \frac{r_{H_2} \cdot H_2 + r_{CH_4} \cdot CH_4 + r_{C_nH_m} \cdot C_nH_m + r_{CO} \cdot CO}{V_{VZ;t}^S + 1 + 5 \cdot r_j - 18,8 \cdot r_{O_2}}$$

$$u_n = 0,0346 \cdot \frac{0,549 \cdot 267 + 0,258 \cdot 131 + 0,027 \cdot 348 + 0,059 \cdot 19}{4,37 + 1 + 5 \cdot 0,102 - 18,8 \cdot 0,005}$$

$$u_n = 1,14 [m \cdot s^{-1}]$$

Pro stanovení maximální spalovací rychlosti koksárenského plynu ve směsi se vzduchem při teplotě 200°C je nutné nejprve stanovit násobek stechiometrického objemu z rovnice (17). Z tabulek jsem odečetl koncentraci koksárenského plynu ve směsi  $k_v = 22,5$  [%]

$$n = \frac{100 - k_v}{k_v \cdot V_{VZ;t}^S} = \frac{100 - 22,5}{22,5 \cdot 4,37} = 0,7882 [-] \quad (17)$$

Následně z rovnice (18) s použitím vypočtených hodnot  $u_n = 1,14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a  $n = 0,7882$  vypočítám maximální spalovací rychlost koksárenského plynu ve směsi se vzduchem při teplotě  $200^\circ\text{C}$  ( $T_2 = 473,15 \text{ K}$ ).

$$u_{n;skut} = u_n \cdot \left[ \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{1,73} - 6,66 \cdot \frac{T_2}{T_1} \cdot \left( \frac{1 + V_{VZ;t}^s}{1 + n \cdot V_{VZ;t}^s} - 1,07 \right)^2 \right] [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (18)$$

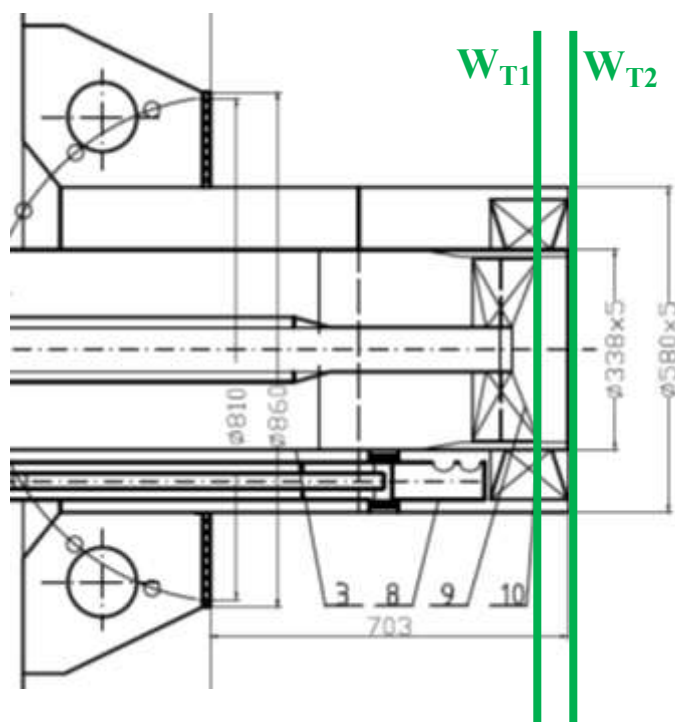
$$u_{n;skut} = 1,14 \cdot \left[ \left( \frac{473,15}{293,15} \right)^{1,73} - 6,66 \cdot \frac{473,15}{293,15} \cdot \left( \frac{1 + 4,37}{1 + 0,7882 \cdot 4,37} - 1,07 \right)^2 \right]$$

$$u_{n;skut} = 2,375 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

#### 6.2.4 Výpočet spalovacích rychlostí v místě $W_{T1}$ a $W_{T2}$

Normálová spalovací rychlost vypočtená ze složení paliva viz výše ( $u_n$ ) lze vztáhnout pouze na spalování nehybné směsi plyných paliv se vzduchem. U proudícího plynu ztrácí pojem normálové spalovací rychlosti smysl a pro vyjádření spalovací rychlosti se používá pojem turbulentní spalovací rychlost.

Výpočet turbulentní spalovací rychlosti provedu ve dvou místech hořáku. Místa, ve kterých tuto rychlost budu počítat, jsou naznačeny na obrázku č.6.2.



Obr.6.2 Naznačení míst výpočtu rychlosti proudu spalín [Příloha č.2]



Pro výpočet turbulentní spalovací rychlosti použijí rovnici (19)

$$W_{Ti} = 0,596 \cdot u_n \cdot D_i^{0,26} \cdot Re^{0,2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (19)$$

kde značí...  $u_n$  spalovací rychlost  $[m \cdot s^{-1}]$

$D_i$  průměr  $[m]$

$Re$  Reynoldsovo číslo  $[-]$

Reynoldsovo číslo proudění směsi z ústí hořáku vypočtu z rovnice (20).

$$Re = \frac{w \cdot D}{\gamma} \quad (20)$$

Kinematickou viskozitu jsem určil z tabulek  $\gamma = 26,07 \times 10^{-6}$  pro teplotu KP 40°C.

Rychlost proudění  $w$  při prvním výpočtu turbulentní spalovací rychlosti  $W_{T1}$

vypočítám jako výstupní rychlost plynu z trysky podle rovnice (21).

$$w = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\mu}{\mu - 1} \cdot P_1 \cdot v_1 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P_1} \right)^{\frac{\mu - 1}{\mu}} \right]} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (21)$$

kde značí...  $\varphi$  rychlostní součinitel plynové trysky

$\mu$  poissonova konstanta

$P_1$  a  $V_1$  tlak a měrný objem před tryskou

$P_0$  tlak v ohništi

$$w_1 = 0,75 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{1,4 - 1} \cdot 103\,325 \cdot 0,497 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{98\,000}{103\,325} \right)^{\frac{1,4 - 1}{1,4}} \right]} = 55 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Reynoldsovo číslo potom vychází:

$$Re = \frac{55 \cdot 0,338}{26,07 \cdot 10^{-6}} = 713\,080 \Rightarrow \textit{turbulentní proudění}$$

Spalovací rychlost v prvním naznačeném místě potom vychází:

$$W_{T1} = 0,596 \cdot 1,14 \cdot 0,338^{0,26} \cdot 713\,080^{0,2} = 7,6 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Pro výpočet druhé naznačené rychlosti  $W_{T2}$  použijí stejné vztahy jako u výpočtu první rychlosti (19) a (20), ale jako rychlost proudění u výpočtu Reynoldsova čísla už neberu výstupní rychlost plynu z trysky, ale již vypočtenou rychlost v prvním naznačeném místě  $W_{T1}$ . Tudíž výslednou rychlost  $W_{T2}$  předpokládám nižší než  $W_{T1}$ .

Výpočet Reynoldsova čísla pro rychlost  $W_{T2}$ :

$$Re = \frac{7,6 \cdot 0,58}{26,07 \cdot 10^{-6}} = 169\,083 \Rightarrow \textit{turbulentní proudění}$$

Spalovací rychlost v druhém naznačeném místě potom vychází:

$$W_{T2} = 0,596 \cdot 1,14 \cdot 0,58^{0,26} \cdot 169\,083^{0,2} = \mathbf{6,55} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

### 6.2.5 Spalovací poměr

Spalovací poměr je poměr mezi množstvím spalovacího vzduchu a plynného paliva přiváděného do hořáku.

$$S = \frac{V_{vh}}{V_{ph}} = n \cdot V_{VZ;t}^S \text{ [m}^3 \cdot \text{m}^{-3}\text{]} \quad (22)$$

kde  $n$  je násobek stechiometrického objemu spalovacího vzduchu, jeho velikost je dána typem hořáku viz.tab.č.6.3, kde jsou uvedeny maximální hodnoty násobku stechiometrického objemu spalovacího vzduchu podle ČSN 07 5801.

$$S = n \cdot V_{VZ;t}^S = 1,08 \cdot 4,37 = \mathbf{4,72} \text{ [m}^3 \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

V praxi se regulace spalovacího poměru provádí tak, že při změně množství plynného paliva se změní ve stejném poměru i množství spalovacího vzduchu.

Druh hořáku podle způsobu přívodu spalovacího vzduchu a vytváření směsi	Násobek stech. objemu vzduchu pro druh paliva	
	Zemní plyn	Ostatní plyny
Hořáky s nuceným přívodem vzduchu a s úplným předmísením, ejekční hořáky s úplným předmísením	1,05	<b>1,08</b>
Hořáky s nuceným přívodem vzduchu a s částečným předmísením	1,08	1,10

Hořáky s nuceným přívodem vzduchu bez předmísení, hořáky s přívodem vzduchu s účinkem tahu spotřebiče bez předmísení	1,15	1,15
Ejekční hořáky s částečným předmísením	1,5	1,5

Tab.č.6.3 Maximální hodnoty násobku stechiometrického objemu spalovacího vzduchu plynových hořáků

### 6.2.6 Výpočet adiabatické spalovací teploty

Adiabatická teplota představuje nejvyšší teplotu, kterou můžeme při spalování paliva dosáhnout. Pro výpočet potřebujeme  $V_{VZ;t}^S = 4,37 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$ , střední měrnou tepelnou kapacitu vzduchu při 200°C  $C_{p,vzd} = 1,31 [KJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$  a střední měrné tepelné kapacity jednotlivých složek spalin.

Nejprve předběžně odhadnu adiabatickou spalovací teplotu na 2000°C a vypočítám pro tuto teplotu měrnou tepelnou kapacitu spalin podle vzorce (23).

$$C_{p,sp} = \sum \frac{V_i}{V} \cdot C_{p,i} = \frac{V_{CO_2}}{V_{sp}} \cdot C_{p,CO_2} + \frac{V_{H_2O}}{V_{sp}} \cdot C_{p,H_2O} + \frac{V_{N_2}}{V_{sp}} \cdot C_{p,N_2} + \frac{V_{O_2}}{V_{sp}} \cdot C_{p,O_2} \quad (23)$$

$$C_{p,sp} = \frac{0,4132}{5,693} \cdot 2,422 + \frac{1,13}{5,693} \cdot 1,963 + \frac{3,53}{5,693} \cdot 1,489 + \frac{0,62}{5,693} \cdot 1,569$$

$$C_{p,sp} = 1,66$$

$$T_{ad} = \frac{Q_i^r + C_{pal} \cdot t_{pal} + n \cdot V_{VZ;t}^S \cdot C_{p,vzd} \cdot T_{vzd}}{V_{sp} \cdot C_{p,sp}} \quad (24)$$

$$T_{ad} = \frac{16\,700 + 9 \cdot 40 + 1,675 \cdot 4,37 \cdot 1,304 \cdot 200}{5,693 \cdot 1,66} = 2\,007 [^{\circ}C]$$

### 6.2.7 Výpočet skutečné teploty plamene

Adiabatická teplota vypočtena výše představuje nejvyšší teplotu, kterou můžeme při spalování paliva dosáhnout. Ve skutečnosti této teploty nikdy nedosáhneme díky tepelným ztrátám a disociaci složek CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O. Pro výpočet skutečné teploty plamene potřebujeme znát pyrometrickou účinnost. Tato účinnost závisí na tvaru hořáku, na typu hořáku, na izolaci spalovacího prostoru atd. V praxi se hodnota pyrometrické účinnosti pohybuje v rozmezí 0,5 až 0,85. Z pravidla platí, že hořáky s předmísenou směsí paliva a okysličovadla mají větší pyrometrickou účinnost než hořáky s difúzním spalováním.

Na základě těchto skutečností volím pyrometrickou účinnost navrhovaného hořáku 0,75. Následně pro výpočet skutečné teploty plamene použiji vzorec (25).

$$\eta_p = \frac{T_{skut}}{T_{ad}} \quad (25)$$

$$T_{skut} = T_{ad} \cdot \eta_p = 2\,007 \cdot 0,75 = \mathbf{1505\, [^{\circ}C]}$$

## 7. Předpis pro provoz navržených plynových hořáků

Předpis obsahuje základní technické parametry navržených plynových hořáků. V této kapitole jsou popsány veškeré výsledky, které by se měly objevit v provozním předpisu plynových hořáků.

### 7.1 Palivo

Parametry a objemové složení KP podle předané analýzy z Koksovny Svoboda

Parametr	Průměrná hodnota	Mezní hodnoty
Teplota	40°C	-
Výhřevnost	16,7 MJ/m <sup>3</sup>	14,7 – 18,0 MJ/m <sup>3</sup>
Spalné teplo	18,72 MJ/m <sup>3</sup>	16,5 – 19,8 MJ/m <sup>3</sup>
Hmotnost	0,500 kg/m <sup>3</sup>	0,455 – 0,520 kg/m <sup>3</sup>
Hutnota	0,379 kg/m <sup>3</sup>	0,352 – 0,420 kg/m <sup>3</sup>
Přetlak na rozdělovači	-	2 – 3 kPa
H <sub>2</sub> S	16 mg/m <sup>3</sup>	7 – 48 mg/m <sup>3</sup>
C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	46 mg/m <sup>3</sup>	41 – 55 mg/m <sup>3</sup>
NH <sub>3</sub>	7,6 mg/m <sup>3</sup>	0,2 – 25 mg/m <sup>3</sup>

Tabulka č.7.1 Parametry KP z Koksovny Svoboda

Složka KP	Průměrná hodnota	Mezní hodnoty
CO <sub>2</sub>	2,6 %	2,1 – 3,4 %
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	2,7 %	2,1 – 3,5 %
O <sub>2</sub>	0,5 %	0,2 – 1 %
H <sub>2</sub>	54,9 %	53,3 – 58,1 %
N <sub>2</sub>	7,5 %	4,3 – 10,2 %

<b>CO</b>	5,9 %	5,3 – 5,9 %
<b>CH<sub>4</sub></b>	25,8 %	22,9 – 27,7 %
<b>Inerty</b>	12,7 %	11,6 – 13,9 %

Tabulka č.7.2 Objemové složení KP z Koksovný Svoboda

## 7.2 Technické parametry navrženého hořáku

<b>Technický parametr</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Maximální průtok KP přes jeden hořák</b>	3 673,5 Nm <sup>3</sup> /hod
<b>Tlak KP pro dosažení max. průtoku</b>	2,0 kPa
<b>Minimální průtok KP přes jeden hořák</b>	1 616 Nm <sup>3</sup> /hod
<b>Tlak KP pro dosažení min. průtoku</b>	0,4 kPa
<b>Regulační rozsah</b>	44 – 100 %
<b>Množství spalovacího vzduchu pro max. výkon</b>	5,6 kg/s
<b>Přebytek vzduchu přiváděného přes hořák</b>	1,08
<b>Teplota spalovacího vzduchu</b>	max. 200°C
<b>Dolní mez zápalnosti (výbušnosti)</b>	4,9 %
<b>Horní mez zápalnosti (výbušnosti)</b>	36,5 %

Tabulka č.7.3 Technické parametry navrženého hořáku

## 7.3 Ostatní údaje

Mezi ostatní údaje, které by měl obsahovat provozní předpis plynových hořáků, jsou např. zapalovací palivo: Zemní plyn. Tlak zemního plynu před zapalovačem 4,5 kPa. Spotřeba zapalovače 7,5 Nm<sup>3</sup>/hod po dobu 10 sekund.

Chladicí vzduch: - tlak: 5,5 kPa

- teplota: 20°C

-množství: cca. 200 Nm<sup>3</sup>/hod

Tlak ovládacího vzduchu by se měl pohybovat v rozmezí min. 0,4MPa / max.0,8MPa Tlakový ovládací vzduch, musí být trvale k dispozici, neboť slouží k ovládání akčních prvků hořáků a příslušenství. Jeho spotřeba může krátkodobě dosáhnout při startu 0,03Nm<sup>3</sup>.s-1, za provozu 0,005Nm<sup>3</sup>.s-1. Musí být čistý a suchý.

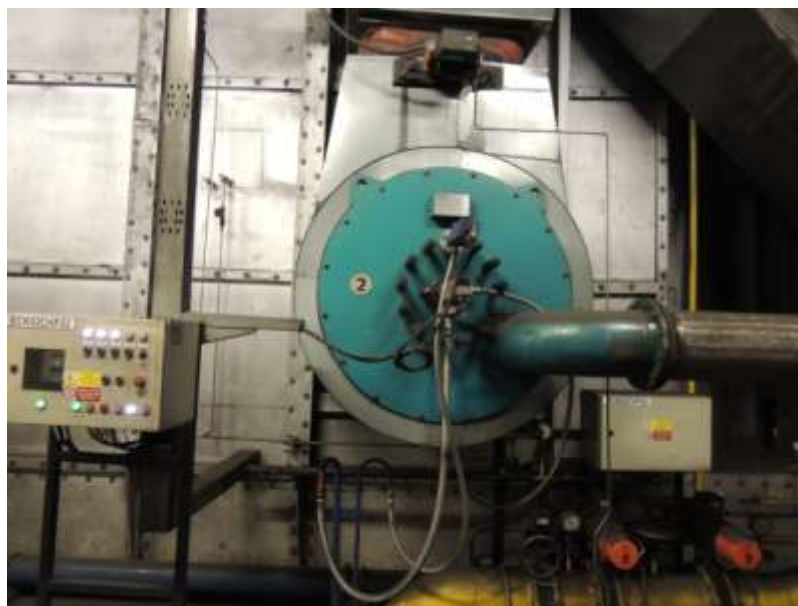
Hodnota hladiny hluku vlastních hořáků nesmí nepřesáhnout hranici 85dB(A) ve vzdálenosti 1m od kotle na volném prostoru.

Dodržení jmenovitého tepelného výkonu hořáků na KP je garantován v toleranci – 0 až +5% při dodržení požadovaných vstupních parametrů paliva

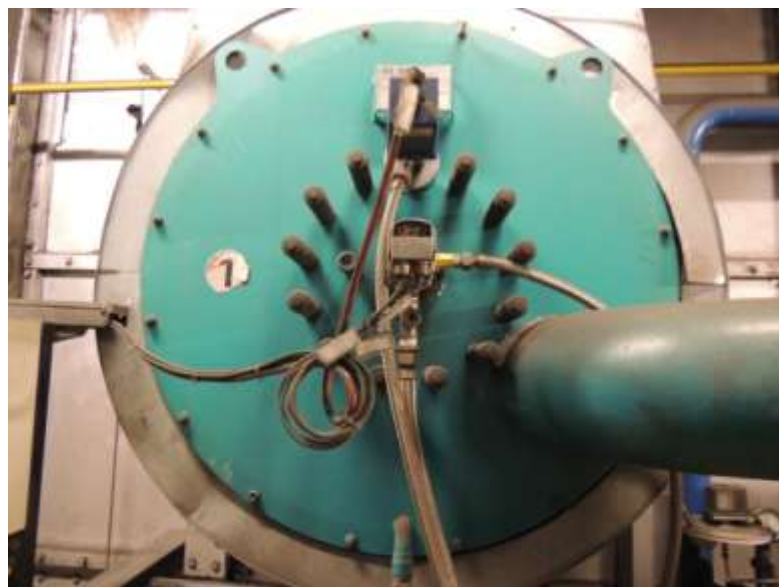
Při provozu kotle pouze na koksárenský plyn, budou dosahovány maximální úrovně emisí v rozsahu:  $\text{NO}_x \leq 180 \text{ mg/m}^3$

$\text{CO} \leq 100 \text{ mg/m}^3$

Dva plynové hořáky, které navrhuji, jsou od firmy Hořáky Třebíč, s.r.o viz obr.7.1 a obr.7.2. Tyto plynové hořáky nejvíce odpovídají navrženým parametrům viz výše.



Obr.č.7.1 Plynový hořák od firmy Hořáky Třebíč, s.r.o. o výkonu 15 MWt



Obr.č.7.2 Plynový hořák od firmy Hořáky Třebíč, s.r.o. o výkonu 15 MWt

## 8. Závěr

Tato diplomová práce se zabývá spalováním přebytků koksárenského plynu v Teplárně Přívoz a návrhem plynových hořáků pro spalování těchto přebytků koksárenského plynu pro kotel K2.

Cílem úprav na kotli K2 bylo, aby tento kotel mohl být provozován pouze na koksárenský plyn do maximálního výkonu 40 MW a také aby mohl být provozován v režimu spoluspalování koksárenského plynu a uhlí. Po úpravě kotle K2 bude schopen tento kotel zajistit 100% zálohu pro kotel K1 nebo K4.

Navržená úprava spočívá v zachování 3 stávajících čelních vířivých hořáků typu STORK a instalaci 2 nových hořáků pouze na koksárenský plyn o vyšším výkonu do bočních stěn spalovací komory.

S ohledem na skutečnost, že na stávajících čelních hořácích bude zachována možnost jejich provozu na zemní plyn, navrhuji, aby 2 nové hořáky byly provedeny jako jednopalivové pro spalování koksárenského plynu.

Základním údajem pro návrh hořáků bylo množství plynu, které musí Teplárna Přívoz odebrat od OKK, Koksovny, a.s. (Koksovna Svoboda). Celkem toto množství činí 15 000 Nm<sup>3</sup>/hod. Toto množství připadá na spalování ve dvou kotlích. Tedy na jeden kotel K2 připadá množství 7 500 Nm<sup>3</sup>/hod. Navrhované hořáky, které musí být schopné toto množství spálit, budou dva. Tudiž výsledné množství plynu na jeden hořák je 3 750 Nm<sup>3</sup>/hod. Z tohoto množství plynu jsem navrhl dva hořáky, každý o výkonu 15 MWt.

Umístění hořáku, které navrhuji je umístění jednořadé vystřídané (varianta c na obr.č.5.1). Toto umístění hořáků by mělo nejméně ovlivnit rovnoměrnost teplotního pole. Umístění hořáku, které navrhuji je naznačeno jak na obrázku č.5.3, tak na výkresu číslo 2, který je přílohou této diplomové práce.

## 9. Použitá literatura

- [1] OCHRANA, L., Kadrnožka, J. *Teplárenství*. Brno : CERM, 2001. ISBN 80-7204-222-X.
- [2] FÍK, Josef. *Lexikon spalování plynu*. 1. vyd. Praha: GAS, 2000, 312 s. ISBN 80-902- 3399-6.
- [3] ČERNÝ, V., Janeba, B., Teyssler, J. *Parní kotle*. Praha : SNTL, 1983.
- [4] Sada obrázků od doc.Dr Ing.Bohumíra Čecha
- [5] FÍK, Josef. *Spalovací vlastnosti ZP (II)*. [online]. Datum vydání: 11. 5. 2004 [cit. 2012-05-11]. ISSN 1801-4399.
- [6] BAUKAL, Charles E. *Heat transfer in industrial combustion*. Boca Raton: CRC Press, c2000, 545 s. ISBN 08-493-1699-5.
- [7] BAUKAL, Charles E. *Industrial Combustion Pollution and Control*. New York: Marcel Dekker, 2004, 904 s. ISBN 08-247-4694-5.
- [8] RYCHTER, A. Zkoušky hořáků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.
- [9] Zprávy katedry energetiky z měření kotlů v Teplárně Přívoz.
- [10] Internetové stránky: <http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-vytapani/8382-kotle-1-cast>
- [11] Internetové stránky: [http://vec.vsb.cz/userfiles/pdf/studijni-materialy/zakl\\_spal.pdf](http://vec.vsb.cz/userfiles/pdf/studijni-materialy/zakl_spal.pdf)
- [12] FÍK, Josef. *Spalování plyných paliv a plynové hořáky*. 1. vyd. Praha: GAS, 1998, 232 s. ISBN 80-861-7601-0.
- [13] ČSN EN 676+A2 (075802) - *Hořáky na plyná paliva s ventilátorem a s automatickým řízením*. 2009. 82 s. technická norma
- [14] BAUKAL, Charles E. *Industrial Burners Handbook*, 1st. edition. USA: CRC Press LLC, 2004, 808 s, ISBN 0-8493-1386-4.
- [15] BERNÁT, J. *Zvýšení podílu spalování koksárenského plynu v kotli s granulačním ohništěm*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2015, 56 s. Vedoucí práce: Čech, B.

## 10. Přílohy

Příloha č.1: Výkres plynový hořák – sestava

Příloha č.2: Výkres umístění plynových hořáků na kotli